

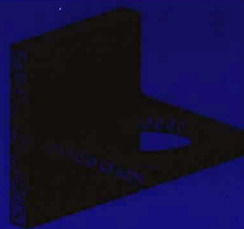
国际机械工程先进技术译丛



CRC Press
Taylor & Francis Group

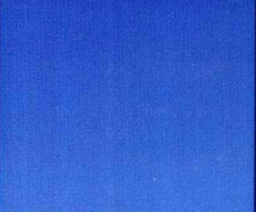
计算机辅助注射模设计和制造

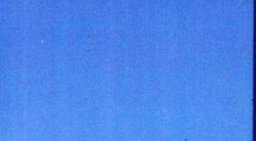
Computer-Aided Injection Mold Design and Manufacture











（新加坡） J. Y. H. Fuh
Y. F. Zhang
A. Y. C. Nee
M.W. Fu 编著

徐佩弦 译





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

技术译丛

计算机辅助注射模设计和制造

（新加坡）J. Y. H. Fuh
Y. F. Zhang
A. Y. C. Nee
M. W. Fu　编著
余佩弦　译



机 械 工 业 出 版 社

本书所述注射模具包括塑料注射模具和金属压铸模具。本书介绍了CAD/CAM/CAE最新的研究和发展成果，详细陈述了三维的注射模具智能化设计的计算机技术，描述了这些常用应用软件的结构和功能，主要内容包括塑料注射模具设计和装配、模具智能设计和装配、半自动金属压铸模具设计、CAE在模具设计中的应用、计算机辅助模具制造的工艺规程、注射模具的早期成本概算、模具设计的IMOLD和IMOLD-Works软件介绍。

本书可作为CAXA、原UG、Pro/E和CATIA等三维应用软件用户，以及注射模具设计和制造人员的参考书，也可作为模具智能设计的入门参考书。

图书在版编目（CIP）数据

计算机辅助注射模设计和制造/（新加坡）付（Fuh，J. Y. H.）等编著；徐佩弦译. —北京：机械工业出版社，2009.12
（国际机械工程先进技术译丛）
书名原文：Computer-aided injection mold design and manufacture
ISBN 978-7-111-29058-2

Ⅰ. 计…　Ⅱ. ①付…②徐…　Ⅲ. ①塑料模具－计算机辅助设计②塑料模具－计算机辅助制造　Ⅳ. TQ320.5-39

中国版本图书馆CIP数据核字（2009）第208986号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）
策划编辑：陈保华　责任编辑：崔滋恩　版式设计：霍永明
封面设计：鞠　杨　责任校对：程俊巧　责任印制：乔　宇
北京京丰印刷厂印刷
2010年1月第1版·第1次印刷
169mm×239mm·19印张·366千字
0 001—3 000册
标准书号：ISBN 978-7-111-29058-2
定价：52.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
社服务中心：（010）88361066
销 售 一 部：（010）68326294
销 售 二 部：（010）88379649
读者服务部：（010）68993821

网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

译　者　序

20世纪90年代以来，计算机辅助制造（CAM）、计算机辅助设计（CAD）和以有限元数值分析为基础的计算机辅助工程（CAE）都有了很大发展，目前已经被机械工程技术人员掌握和应用。近年来，高级的三维软件又开发了新的注射模具智能化模块。这种注射模具专家系统，从注射制品的三维造型开始进行注射充模流动等工艺分析，到模具装配体集成、模具零件加工的工艺规程优化和数控编程、早期的注射模具制造报价成本概算等，都能在计算机辅助下高效率完成。

在模具工程所有工作量中，设计工作占了20%，CAM编程占了8%。设计工作的一半与型芯和型腔设计有关。以高智慧的模具设计知识、模具生产和设计信息的数据库及三维实体造型和集成的计算机技术为基础，半自动地进行模具优化设计，提高了设计质量。如今网络信息技术的发展，支持和延伸了注射模具的CAD，使注射模具的设计和制造向前迈进了一大步。

本书所述的注射模具，包括塑料注射模和金属压铸模。书中介绍了CAD/CAM/CAE最新的发展和研究成果，详细陈述了三维注射模具智能化设计的计算机辅助技术，介绍了这些常用应用软件的结构和功能。

第1章概述了CAD/CAM技术对模具设计和制造的重要性及在产业中的影响，并讨论了存在的关键技术问题。第2章和第3章描述了塑料注射模具设计智能化专家系统的功能，阐述了分型面确定、型腔的数目和布局确定、型腔和型芯的优化设计、流道和浇口设计、模架选择、顶出脱模机构设计和冷却系统布置等。对侧向分型确定、外侧滑块机构和内滑杆抽芯机构的特征设计，也都给予了说明和示例。从成型特征的识别到模具装配体的集成，用注射模具的设计理论和计算机技术，阐述了智能化专家系统的研究和发展过程。第4章阐述了金属压铸模具的计算机智能化设计方法和步骤，以金属熔料为注射对象，全面介绍了压铸模专家模块的设计功能。第5章讨论了CAE和计算机数值分析在模具设计方面的应用。阐明了注射模具的流动、冷却、收缩和翘曲分析对提高制品和模具设计质量的意义。第6章深入讨论了计算机辅助模具制造和加工。对选择刀具、刀具路径生成和电火花加工中的电极设计等给予了完整的描述。这些内容对注射模具的CAM用户用数控技术加工复杂模具零件，满足高速切削加工要求，都有很大的用处。第7章的内容是计算机辅助工艺系统在模具制造应用方面的发展，讨论了应用计算机技术实现工艺规程的优化问题，并着重分析了侧滑块和内滑杆的工

艺规程。第8章介绍了早期的注射模具制造成本概算的研究。第9章给出了塑料注射模和金属压铸模两个模具智能化设计系统的实例。

本书原著者是新加坡国立大学的J. Y. H. Fun等几位教授，他们是注射模具的CAD/CAM/CAE方面的专家。本书全面而深入地介绍了他们的研究成果，在计算机辅助注射模智能化设计系统的运算法则、执行方法、系统结构等方面，有详细描述。CAXA、UG、Pro/E和CATIA等三维应用软件用户，为了掌握高级三维应用软件，需阅读成堆操作手册。而本书能帮助他们更深入地理解这些软件。本书可为注射模具设计和制造者提供更有效的信息，也可以作为一本模具智能化设计入门的基础教材。

译者力求在理解的基础上，将文字处理得清晰、明确和流畅。对原著在注射模具技术和计算机技术的专业用语，按国内流行的习惯词语译出，公式、数据和商业信息等基本照搬，极少数难以理解的内容，在语句上作拘谨直译。译文中差错和缺憾在所难免，敬请读者谅解并给予批评指正。

华东理工大学高分子材料系　徐佩弦

序　言

模具制造是精密制造行业的重要组成部分。计算机、家用电器、医疗器械、汽车等消费类产品零部件的70%都由模具成型制造。目前，缩短设计和制造周期、保证制品达到精确的尺寸和位置要求、实现全面的质量管理及快速的设计、灵活的修改等方面已经成为模具制造行业的发展瓶颈。为保持竞争优势，迫切需要使设计过程自动化，从而缩短周期和降低制造成本。近20年的CAD/CAM技术的发展对提高模具工程效率具有十分重要的意义。其综合的设计、分析和制造等功能，对工程实践产生了巨大的影响。

尽管CAD/CAM技术在工程中有着广泛的应用，但它在模具设计和制造中受到了相关方面的制约。现在，很多制造厂都试用采用三维的CAD软件进行模具设计来提高生产力，但软件的操作手册令人畏惧，使得这些设计软件运用起来既耗时又易出错，缺乏全自动或者半自动的系统。因此，自20世纪90年代以来，计算机辅助注射模设计系统，CADIMDS（computer-aided injection mold design systems）的发展是一种必然趋势，也成为了工业界和学术界的研究热点。

本书的写作目的，是介绍塑料注射模和金属压铸模设计和制造方面最新的研究和发展水平。希望它能促进计算机辅助注射模设计系统CADIMDS的应用，并促进这个关键领域有更大的发展。尽管大部分CAD/CAM供应商在积极开发模具设计和制造的应用模块，但依然有许多技术问题需要解决。8年来，作者在新加坡国立大学，进行关于模具智能设计技术方面的研究。在此期间的许多重要发现，都写进了本书。模具设计智能化和集成系统的发展及商品化，在本书各章节都有详细的陈述。对这个系统结构体系的介绍及详细的技术描述，对CADIMDS在CAD/CAM市场上的发展十分有用。

第1章介绍了CAD/CAM技术在模具设计，如工、夹具和注射模具设计等方面的历史背景，突出了研究和发展成就的重要性及其在产业中的影响，对瓶颈问题和技术疑问也有详尽的叙述。第2章介绍了塑料注射模及其模具设计的主要概念，陈述了包括型腔、型芯、流道和浇口设计，模架选择，顶出脱模机构设计，以及冷却系统布置等设计过程。关于注射件分型面和分型方向优化，以及型腔和型芯的生成方面，也都给予了说明和示例。侧向分型和内、外侧抽芯机构的特征设计是该章的重点。第3章主要介绍了全自动系统的模具智能设计及其集成技术。优化注射件的成型方向和分型面的线路及成型表面的计算法则等，都通过具有代表性的例子来说明。第4章陈述了半自动的压铸模具的设计方法。它和塑料

注射模具的设计步骤是类似的，只不过它注射的是金属而已，如铝、镁等合金。参变量和基准面的设计步骤和方法，在这一章也有提及。

关于 CAE 和计算机分析在模具设计方面的应用，在第 5 章进行了介绍。这一章填补了注射模具设计和制造的空白，使得 CAD/CAM/CAE 系统在模具制造设计方面的应用更加完整。第 6 章讨论了模具制造和加工，包括型腔及型芯部件的细节，重点是如何来选择刀具，以保证在三轴加工中的切削自如。本章对电火花加工中的电极设计也有完整的描述。这些内容对于设计和使用数控技术加工复杂注射模的 CAM 用户有极大的用处。第 7 章的内容是计算机辅助工艺过程，CAPP 在模具制造方面的应用与发展。相关的步骤、执行及其模式等内容在这一章也有提及。模具制造工艺的编制和模具制造成本的初步估测等内容都在第 8 章。基于 UNIX 平台和 Windows 平台的模具智能化设计系统的案例研究，其相关内容都在第 9 章中给出。Windows 平台下，模具设计系统和参数化的造型设计系统的原理，都在本章通过示例得到了诠释。执行的细节也通过许多工程实例来体现。

模具成型和成型技术对大部分工程材料，金属和塑料的处理十分重要。本书还介绍了注射模具 CAD/CAM/CAE 方面的研究者、研究组织及相关大学，也尽可能全面和深入陈述他们的研究成果，并聚焦在能够产生全自动或半自动的计算机辅助注射模具设计系统，CADIMDS 的运算法则、执行方法、系统结构等方面。本书也试图为设计者和创新者在这个具有挑战性领域，提供有效的信息。本书可以作为一本设计手册或者作为模具智能设计的入门导读。我们真诚地期望通过这本书，让研究和工业领域在 CAD/CAM/CAE 关键技术方面，获得更大的成就。希望本书能够有益于整个工程领域。

J. Y. H. Fuh
Y. F. Zhang
A. Y. C. Nee
M. W. Fu

致 谢

我们受惠于下面所列举的个人和组织，正是在他们慷慨的支持，新加坡国立大学才能在过去8年里在模具智能设计及其研究方面取得了一定的成果，本书的出版才成为可能。

1）新加坡国立大学NUS（The National University of Singapore）工程学院和机械工程系提供了研究基金，建立并指导模具研究小组，提供了相关资源。

2）新加坡国立大学支持启动公司（Manusoft Technology Pte. Ltd）在工业企业和CAD/CAM团体中，帮助推广技术方面的研究结果。

3）原名为国立科学技术部NSTB（The National Sicience and Technology Board），现更名为新加坡科学、技术和研究机构（The for Science，Technology and Research. A*Star，Singapore），主持了IMOLD® 产品方面的关键研究项目。

4）K. S. Lee副教授协同指导了一些学生实验，共同研究了各种试验项目，并对新加坡国立大学附属公司的起动做出很大贡献。

5）M. Rahman副教授在协同指导和小组研究讨论方面有贡献。

6）Mr. Kok Ann、Mr. Victor Gan、Mr. Zhiqiang Zhao、Mr. Ying Wang、Mr. P. Sameer、Mr. LeshuLing和Mr. Xilin Liu，从软件公司提供了模具设计研究方案和图片。

7）Dr. Xiaogao Ye、Dr. Xiaoming Ding、Dr. Shenghui Wu、Dr. Li Kong、Dr. Liping Zhang、Dr. M. R. Alam、Dr. Yifen Sun和Ms Guohua Ma，提供了自己的部分研究结果。

最后，向我们的家庭成员表达谢意。感谢他们在整个出版期间给予的支持。他们的理解和支持对于这本书的完成来说是无价的。

J. Y. H. Fuh
Y. F. Zhang
A. Y. C. Nee
M. W. Fu

目　　录

第 1 章　概　　述

1.1　CAD/CAM 技术在模具加工中的应用

模具工程是制造工程中的重要组成部分。任何现有加工方法的直接改进或新技术的导入，都可显著提高生产效率和产品质量，并缩短设计和加工时间。这些改进将增强制造企业的竞争力，并使他们在竞争者面前保持优势。模具设计制造是制造加工业的一个重要领域。没有合适的模具，制造加工过程就会变得残缺，整体加工就会效率低下。模具设计师需要有熟练的技术和多年的实际设计经验。他们通过学习和实践获得知识，实际设计经验多于深入的科学分析和研究所获得的经验。随着 20 世纪 80 年代初期 CAD/CAM/CAE 工具的导入和电脑应用的加深，这一模式发生了迅速的改变。CAD/CAM/CAE 技术会在模具工业中，在缩短设计和制造周期方面，发挥越来越重要的作用。

本章将介绍 CAD /CAM 技术在模具设计方面应用的历史背景，着重介绍其在该领域的一些研究和发展成就。一方面是在本书的后面章节中将要讨论到的注射模和压铸模设计技术。另一方面是模具加工中的夹具设计技术，将讨论夹具在加工中的方向、位置和支承部件的设计等。所有这些方面，过去都依赖经验丰富的模具设计师。然而，不幸的是，由于这些必要的技能需要较长时间去获取，使得年轻一代不想加入到这个行业中，导致模具人才在全世界都是短缺的。

1.1.1　夹具设计

1. 简介

夹具是辅助加工、装配、检测及其他加工操作中常用的机械装置。这种装置以一种可以预测和重复的方式，确定和保持工件间的相互关联，保证设计要求的位置和方向。随着 CNC 技术性能的增强，多轴数控加工机床能够执行相关操作并能减少装夹加工工序，使设计夹具的任务变得稍微简单。可是，制造新夹具依然需要应对更快的响应时间，以缩短设计和制造周期。柔性制造系统，FMS 的迅速发展和应用增加了对万能夹具的需求。因为缺乏灵活性，而且重复使用效率低，使得使用多年的传统夹具已经不能满足现代制造业的要求。对于更小的批量和更快投产的要求，具有标准组件和灵活性的标准夹具，在自动化制造系统中替代专用夹具优势极为明显。

标准夹具是由底座、定位件、支撑件和紧固件等标准元件组成的。这些元件已被设计成拆卸后可重复使用的结构，能够装配到一起而不需要额外的加工操作[1]。应用标准夹具的主要优势在于它们的灵活性，且能够减少预期的制造时间和成本。夹具设计的自动化，尤其是基孔制的采用，是基于标准夹具的概念的[2,3,4]。这主要是因为标准夹具具有下列特征：

1）可预测和有限数目的定位和支撑位置，能引导寻找并确定最适宜的精确位置。

2）装配和拆卸轻松，且使采用机器人装置完成自动装配成为可能。

3）由于采用有限数目的元件组合，使专门的设计规则相应减少。

2. 计算机辅助夹具设计

对夹具设计导入计算机辅助完成的研究始于20世纪70年代末、80年代初。最初，交互式或半自动的夹具设计技术是建立在商业的CAD/CAM系统和专用的工具系统上的。计算机辅助设计标准夹具见图1-1。其主要步骤和夹具的结构有关，还有其他方面分析，如工件、夹具、切削刀具间的交互作用等。

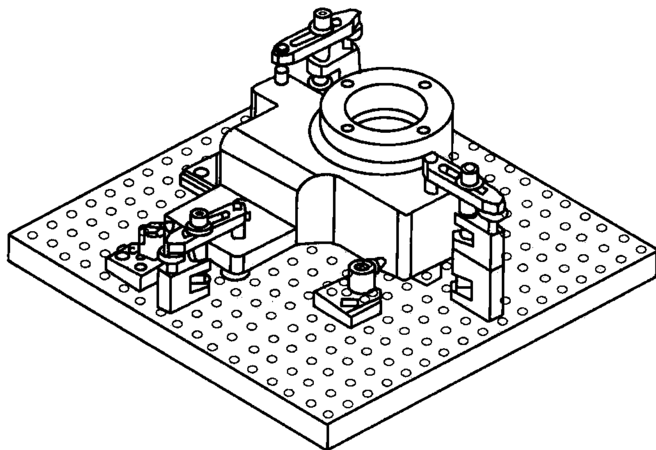


图1-1 计算机辅助设计标准夹具[2]

全面的夹具研究应当包括多方面的计算分析，包括几何学、运动学、力学及变形的分析计算。下面将对这些方面的研究作一个大纲式的表述。设计一个智能型的夹具，也能够综合借鉴这些分析的工具。

（1）几何学分析

几何学分析和夹具的设想及空间推理关系紧密。它决定了夹具元件的选择种类和数量，如定位和固定元件、基准平面的要求等。这些分析也包括了工件和夹具元件及切削刀具间干涉的检查。

早期的夹具研究大多包括几何学分析和夹具构架的综合分析，却对相关的运动学分析和变形分析关注较少。

（2）运动学分析

运动学分析用来确定夹具结构，是否能够对工件提供正确的定位和完全的约束。

先前的夹具设计工作在标准夹具设计和制造中很少自动提供全面的夹具元件数据库和有效的装配方案。标准夹具的装配就是配置夹具元件，比如将定位元件、夹紧元件和支承件，根据夹具的原理装配在底座上。装配标准夹具是定位、支承和紧固点的确定，也是夹具自动化设计的关键点和难点。

（3）力学分析

夹具工作时要承受不同作用的力，有惯性力、重力、切削力和夹紧力等。前面三种力较容易预知。而夹紧力则随着工件大小、受力点、加工程序等条件的不同而不同。

众所周知，把夹具里所有作用力进行完全的分析是件困难的任务。因为存在有大量夹具零件的不确定性问题。当摩擦力计入计算时，这个问题就变得更加的复杂。因为静摩擦的大小和方向都是未知的。夹紧力分析方面的最新成就可以查阅参考文献［5，6］。

（4）变形分析

由于复合力的相互作用，工件的变形可以描述为各种因素的综合。首先，工件会在高速切削力和夹紧力的作用下变形。其次，如果工件的支承和定位零件没有足够的刚度来抵御上述力的作用，该工件也会变形。已经公开的文献资料都假设工件的变形，主要由上述的第一种情况产生的。最有效的工件变形和夹紧力分析是有限元分析法。

1.1.2 模塑成型和模具设计

模塑生产和成型模具制造是个重要的支柱产业。在消费类产品中，70%的非标准件的成型制造与模具有关。模塑制品具有批量小、种类多的特点。设计和制造周期短、尺寸精度和质量要求高，以及设计的迅速变更等，已经成为模塑和模具工业发展的瓶颈。模塑和模具制造厂都希望在国内和国际市场上保持它们的领先优势，都通过采用先进的制造设备、自动化的制造方法及提高工人的技术水平等手段来努力缩短制造周期。

在1909年，贝尔克兰德和他的同事用甲醛和苯酚合成了一种命名为酚醛树脂的合成新材料，标志着塑料材料开始应用。现在习惯使用的塑料，是指能模塑成复杂形状的有机合成材料。塑料件的结构可以设计得比金属铸造件和冲压件更复杂，更细致。而且塑料制品的批量成本低，订货至交货时间短。实际上，几乎

每个平常的产品上都有塑料件，因此塑料注射模有大量的需求。

在塑料注射成型过程中，注射前需要在模具之外容器中通过加热和机械剪切，使塑料材料变成粘流态。接着在外部高压作用下将其注入模具。两半模具在锁模压力作用下，液态软化的塑料会冷却固化。开模后将注射件脱出。接着整个循环重新开始。注射件的精确度、冷却效率及循环时间等，依赖于模具设计及其注射操作的控制参数。图 1-2 所示为注射模具的型腔和嵌入型芯。

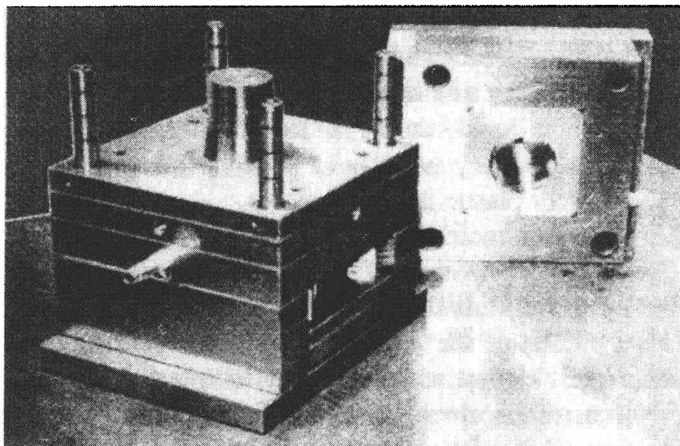


图 1-2 注射模具的型腔和嵌入型芯

过去，成型制造在很大程度上是凭经验的积累，依赖于富有技能的技工。他们经过学徒训练，并通过数年的实践，获得专门的技术。年轻的一代不愿意经过长时间的培训，他们更加青睐于其他工种。经过培训的技工正在迅速地减少。随着 20 世纪 70 年代末期 CAD/CAM 技术的引进，这一情形在某些领域内已经得到改善。模具制造在很大程度上，已经从个人获取知识，变更到基于计算机智能系统取得知识。但同其他制造领域的计算机应用相比较，模具设计进步较为缓慢。最近，应用于模具制造和成型产业的商品化软件已经出现。

在模具制造工业方面，最新的计算机辅助制造的研究数据显示[8]，模具设计占了在模具工程所有工作的 20%，CAM 编程占了 8%。这 20% 左右的设计工作的一半，与型芯与型腔的设计有关。剩余的工作和模架的选择及准备用于制造的模型有关。通过这个分析可以看出，模具设计是模具工程中最主要的部分。设计工作的高度集中，使得许多软件系统聚焦于从模具设计角度提供解决方案。这些软件系统能够从多个设计角度帮助工程师完成设计，如自动化的分型面确定、型芯和型腔的设计、流道和浇口的确定、模具内部的温度分布的分析、模内塑料熔体的流动分析及不同模架选用的效用等。

1.2 注射模具方面的 CAD/CAM

设计过程的自动化是缩短设计周期的重要一步。注射模具计算机辅助设计系统 CADIMDS（Computer-Aided Injection Mold Design System）的方法已经成为工业界和学术界的研究热点。IMOLD® 系统设计的注射模见图 1-3。CAD/CAM/CAE 工具在最近 20 年中已经有了长足的发展，能够在模具的结构设计、分析和制造等方面辅助模具设计师完成大量的工作。

1）在模具车间里，越来越多的塑料注射件设计是以电子文档形式来描述的。人们期望在最近几年内，其所占比例能够从目前的 53% 上升到 90%。这要求模具设计师使用兼容的 CAD 软件来取得注射件的设计信息，校订设计并作必要的变更，使其成为满足所有制造标准的三维设计造型。

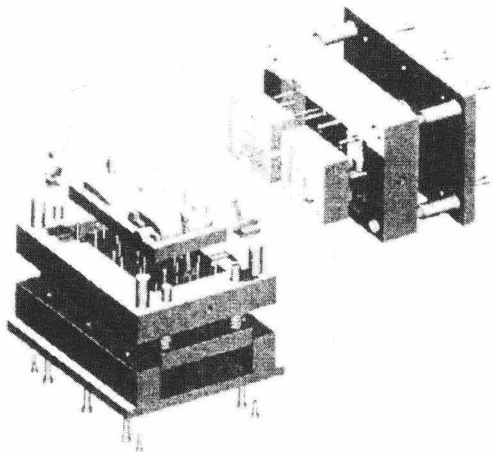


图 1-3 IMOLD® 系统设计的注射模[9]
（新加坡 Manusoft Technology 公司许可）

2）计算机辅助工程（CAE）软件，如充模流动和温度分析系统被用来模拟流道和浇口的设计及塑料注射过程，检查被成型塑件可能出现的缺陷。这些反馈信息被用来修正成型零件或模具，以便达到最合适塑料流动和冷却的要求。

3）CAM 软件可来直接产生数控刀具路径，加工复杂三维表面。这些软件设计基于数控加工工作轴的数目和数控机床的结构。随着高速加工技术的出现，它们被模具制造者迅速采用。目前，新的 CAM 软件已被用于高速切削加工和进给，如图 1-4 所示。

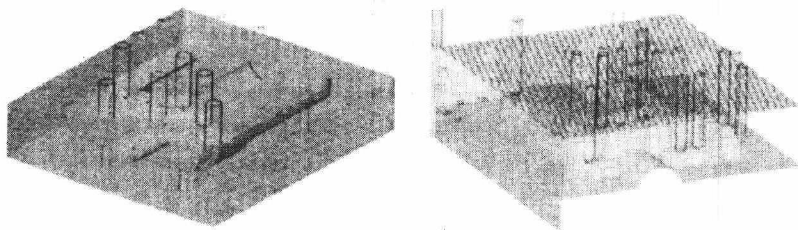


图 1-4 计算机辅助模具的切削加工

4）尽管高速切削加工减少了高硬度的模具钢电火花的加工量。但电火花加工能很好地处理模具上细节的优势，使其在模具制造中依然是必需的。CAD/CAM 软件能够从型腔中提取加工特征来设计复杂三维表面加工时的电极。

5）许多模具设计企业依然喜好使用二维图样，来表达他们的设计和装配细节。能自动地从最终的三维设计中产生二维图样，并具有尺寸标注和注释功能的 CAD 软件已经更加流行。

1.2.1 塑料注射模具

本节将概述计算机辅助塑料注射模具设计及制造。一些设计问题，如分型方向和分型面的确定、模具的冷却分析、电火花（EDM）的电极加工及模具加工法则等，将在下面的章节里有详细的介绍。注射模具设计方面的发展新趋势，也将在这里进行简要的讨论。

1. 智能型系统的自动化模具设计

自动化的模具设计和制造功能，可为模具制造企业提供强大的生产力。知识型系统，如 Cimatron Technologies（以色列）、Vero International（英国）、Bentley System（美国）和 IMOLD（新加坡）等就是增加了自动操作的模具设计，有许多常规的 CAD 功能模块的系统。

在典型的知识型系统中，模具零部件都是从模具基本库中选取的标准零件。零部件被设计者作个简单的说明，就可找到自己的位置。例如，选定了一根推杆，系统就会自动在装配图的型腔板上添加与之相适应的安装孔。基于有这种关联组合的智能特征，设计者不用担心细节丢失或在最终装配时发生不能相互配合的情况。CAM 系统同样灵巧，能够在加工的任何时候辨认出哪里依然有余量。它能够在刀具离开后认出边角材料，并详细说明随后的小直径刀具，对未加工部分的切削轨迹。其另外一个特征是自动辨认两次加工轨迹中间的跨越区域，并重复加工这些区域以确保最终成型表面良好。CAM 系统最终的目标是使其能够仔细检测所有的三维轮廓，并自动提供最佳的加工策略。这就要求 CAM 系统成为既有利用自动特征识别的知识型系统，同时又具有几何学依据和经验的系统。

2. 网络技术在模具设计及制造中的应用

最近 5 年，网络技术的连接速度越来越快，种类繁多的网络活动普遍增加。尽管其发展速度较电子商务领域慢，但模具设计和制造还是因为这项新技术而受益。基于网络系统有益于更快速地传递信息，并能够为集中指挥地点分散的设计和制造，提供良好的支持。使人们能在定价合理性和资源可用性方面受益。

协作制造的精细管理（cPDM，Collaborative Product Definition Management），已经应用到生产周期并贯穿在整个企业中[11]。虽然传统的 PDM 方法在设计工程中有自己的基础，但是 cPDM 在企业内基础部门和组织，包括制造、营销、现场

支持、零售及分配、服务和维修、产品寿命考察等，来支持整个周期中的产品精细管理。基于网络的 cPDM 系统为公司提供了很好机会来认识生产周期的精细全面管理。这种方法将很快被模具设计和制造公司采用。

最近，K. H. Lau 等人[12]介绍了基于互联网的完整 CAE 系统，它支持灵活的塑料模具设计和改进 APMD（agile plastic mold design and development）过程。这个系统包含四方面特征：①CAE 配合并支持设计智能化；②支持多个工程的工具集成及网络的开放和延展环境的构架；③使设计工作满足客户的需求；④支持知识的获取和重用。

1.2.2　金属压铸模具

金属压铸是用铝、镁、锌、钴等有色金属，生产尺寸精确、形状简单或复杂铸件的方法。它和塑料注射成型方法有很强的相似性。模具的设计方法和使用的成型机械装置也有十分密切的联系。选择模压铸造，主要是因为压铸件具有良好的强度和更好的精确度。与塑料注射成型相似，在高压下熔融的金属被注射进入压铸模的型腔，在固化后从模具中脱出。压铸模具不仅含有主要的部件，如模架等，还有其他物理参量控制，如熔融的金属材料流动、热量传递及由压铸机提供压力等。在本书中，将按工业习惯把压铸模具称为“die casting die”。

模具设计是包含一些重要工作的复杂的过程。一副完整的压铸模具的设计过程，包括布局、浇口、模架、注射系统、开模、冷却系统及抽芯机构等部分的设计。所开发的设计系统应能够完成上述所有的设计任务。这些任务被分为不同的功能组，并由系统的相应的模块来完成。详细的情况将在第 4 章中讨论到。

1.3　综述

本章节概要叙述了在最近 20 年里，机械加工中应用计算机工具的发展历史和研究背景，并预测了一些未来的趋势。

尽管夹具设计和规则被习惯性地当作与艺术差不多的科学，但现在却可以成功地应用计算机软件设计和规划它。但最佳的夹紧力控制，依然是基本的难点。随着智能夹具对动态夹紧力控制的发展，工件的精确性可以在加工中控制，这将进一步增强自动制造系统操控的连续性。

与之类似，模具制造者也可以采用高级的软件运算法则、先进的机械加工和计算机技术了。如今，模具设计和制造已经向前迈进了一大步。过去依靠经验技术的模具行业，现在已经发生了彻底的改革，并很大程度上依靠 IT 技术。客户现在可以看到，在有更好的制品质量的基础上，有更短的交货时间。未来几年内，在远程分发式设计和电子商务活动方面，网络技术的应用将扮演越来越重要

的角色。

设计和制造过程的“黑色艺术”，已经转变成基于科学和IT技术的学科。读者可以参考“IMechE Part B proceedings”来解决模具方面的特殊问题，这本书介绍了计算机工具在模具的设计、仿真和分析方面的应用成果[14]。

通过计算机工具和网络技术海量的增长趋势可预见，加工设计活动的地理位置因素将消除，对专门技术的依赖性也将逐渐减少。

参考文献

[1] A.Y.C. Nee, K. Whybrew and A. Senthil Kumar, Advanced Fixture Design for FMS, Springer-Verlag, 1995.

[2] J.R. Dai, A.Y.C Nee, J.Y.H. Fuh and A. Senthil Kumar, "An approach to automating modular fixture design and assembly", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B, J of Engineering Manufacture, 211, Part B, pp. 509-521, 1997.

[3] T.S. Kow, A. Senthil Kumar and J.Y.H. Fuh, "An Integrated approach to collision-free computer-aided modular fixture design", International J of Advanced Manufacturing Technology, 16, No. 4, pp. 233-242, 2000.

[4] A. Senthil Kumar, J.Y.H. Fuh and T.S. Kow, "An automated design and assembly of interference-free modular fixture setup", Computer-Aided Design, 32:10, pp. 583-596, 2000.

[5] Z.J. Tao, A. Senthil Kumar and A.Y.C. Nee, "Automatic generation of dynamic clamping forces for machining fixtures", International J of Production Research, 37:12, pp. 2755-2776, 1999.

[6] A.Y.C. Nee, A. Senthil Kumar and Z.J. Tao, "An intelligent fixture with dynamic clamping scheme", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B, J of Engineering Manufacture, Vol. 214, pp. 193-196, 2000.

[7] M.L. Begeman and B.H. Amstead, Manufacturing Processes, John Wiley, 1968.

[8] A. Christman, CIMdata – "Mold design – a critical and rapidly changing technology", MMS Online, Gardner Publication, Inc., 2001.

[9] IMOLDWorks, Manusoft Technology Pte. Ltd., Singapore, http://www.manusoftcorp.com, 2003.

[10] M. Albert and T. Beard, "Die/Mold machining on the march", MMS Online, Gardner Publication, Inc., 2001.

[11] E. Miller, "Collaborative Product Definition Management for the 21st Century", Computer-Aided Engineering Magazine, March, 2000.

[12] K.H. Lau, K.W. Chan and K.P. Cheng, "Internet based CAE in agile plastic mold design and development", Proceedings of 2002 International CIRP Design Seminar, 16-18 May 2002, Hong Kong.

[13] NADCA, North American Die Casting Association, http://www.diecasting.org, 2001.

[14] A.Y.C. Nee, Guest Editor, Special Issue on Molds and Dies, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, J of Engineering Manufacture Vol. 216, No. B12, 2002.

第 2 章　塑料注射模具设计和装配

2.1　概述

塑料注射模具由型芯和型腔凹模组成，用来模塑成型注射件[1]。型芯成型注射件的内部表面，型腔凹模成型塑料制件的外部表面。在模具的组成中，型芯和凹模是最重要的工作零部件。注射件在型芯和凹模之间的型腔内成型，并在型芯和凹模分开后脱出。沿着型芯和凹模反向分开方向被称为开模方向。对于给定的制件，一组表面是由型芯和它的嵌件来成型的，另一组表面是由凹模及它的嵌件来成型的。因此，分型面是由型芯、凹模及它们的嵌件在成型表面之间的交界面组成。分型面是型芯和型腔凹模之间的配合表面。在模塑制件里，凸起和凹下部分都被认作成型加工特征，又称切削加工特征、成形特征或加工特征。如果这个成型加工特征不能被型芯和凹模及它们的嵌件成型，则在模具构造中可能需要侧型芯、侧型腔凹模、成型杆或分离式型芯等结构。这些侧型芯、侧型腔、成型杆或分离式型芯等被称为局部成型零部件。它们在成型过程中被用来成型注射件局部的形体特征。这些局部成型零部件在注射成型时要单独安置机械机构。侧型芯和侧凹模等由滑块机构驱动。

注射模具主要的部件是模板、凹模、型芯、浇口套、定位圈、脱模零部件、侧型芯、侧凹模及传动机构（滑块、脱模顶出机构）等。辅助机构包括导套、导柱、限位销及紧固件（螺钉、螺栓和螺母）等。冷却管路和供水系统是注射模具机构中的重要部分。注射模具的主要任务是接受注射部件传输的熔融塑料，并将这些熔融的塑料模塑成塑料制件最终的形状。这个任务是由型芯、凹模和嵌件组成的成型零部件组成的机构完成的。除了压力传输和固化成型塑料制件的任务外，一个注射模具还必须完成一些其他任务，如分配熔融物料、冷却熔料、顶出塑料制件、动作传递、位置引导、上下模的定位对准等。不同的注射模具中满足这些功能的零部件，在结构和几何形状方面通常是相似的。所以说，注射模具是由许多功能零部件组成，能满足多种功能的复杂机械装配体。它接受来自注射机喷嘴的塑料熔体，并将它冷却成期望的形状。图 2-1 表示了塑料成型注射模具一些子系统的组成。本章将仔细研究一副模具的机械结构，并讨论模具行业的主要设计方法。

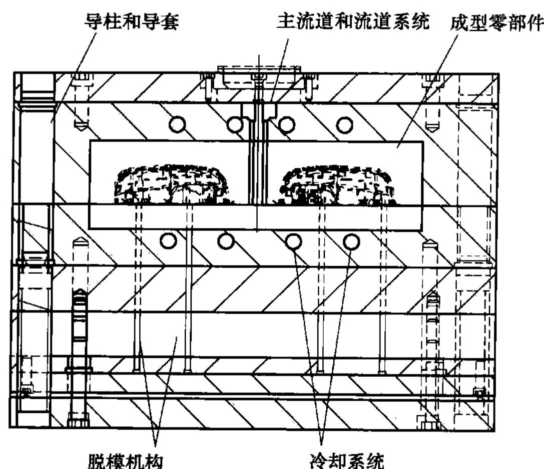


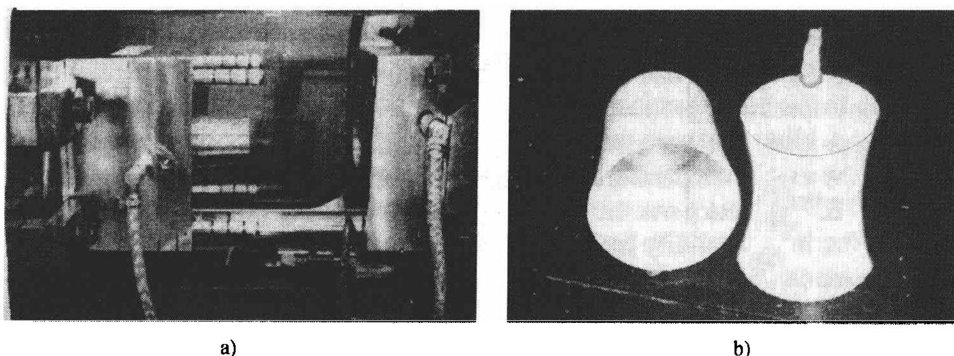
图 2-1 典型的塑料注射模具

2.2 塑料注射模具设计

2.2.1 注射成型及其模具

塑料制品在从消费类产品到机械、汽车、飞机等广阔的领域应用得越来越多。注射成型依靠材料形态随温度的改变，间歇得到塑料制品的最终形状。注射模塑成型方法已经成为重要的塑料制造方法。这种制造方法迫使液态材料填满模具的模腔，并在其中固化。

注射成型在压力的作用下将材料注入模腔，并将材料模塑成期望的形状。它是一个循环的生产过程。热塑性材料的注射成型包括三个主要阶段：注射和充填；冷却；脱模并重新开始。在这个循环过程的第一阶段，材料处于熔融状态，是高粘度的流体。它在复杂的模具流道中间流动，并迅速冷却。模具的流道是限制材料流动的墙，另一方面它还具有散热功能。然后，软化的聚合物在注射装置高压的作用下固化冷却。最后，模具打开注射件被脱出，接着注射机就复位，另一个循环开始。最终的形状经冷却固化（热塑性塑料）或化学反应（热固性塑料）得到。对大多数具有一定尺寸精度的复杂制品零件来说，这是通用的操作方法。因为脱模的制品很少或不需修整操作。热塑性塑料和热固性塑料用聚合物做粘合基体。这种加工方法还可以扩展到其他材料的加工，如纤维、陶瓷及粉末材料等。大约有32%的塑料，能用注射加工成型[2]。图2-2 表示的是一个装在注射成型机上准备生产的注射模具。



a)　　b)

图 2-2　注射成型实例

a）装在注射成型机上的注射模具　b）模塑件或注射件

典型的注射模具是钢制模板和成型零部件组成的装配体。塑料在模具模腔中定型。定模固定在注射机的料筒和喷嘴的一侧，并通过导柱与动模相关联。型腔板通常安装在定模固定板上。在导柱的导向下，型芯随着动模板移动。也有将型芯装在定模固定板，将型腔凹模装在动模板上的情况。

注射模具由动模板件和定模板件联成一体，如图 2-1 所示。定模板上有成型型腔、主流道和流道系统、拉料杆和冷却管道等。注射模具是个热交换装置，它使熔化的热塑性塑料成型为一定形状和尺寸精度的固态制品。模具包括动模部分和定模部分，当这两部分接触闭合时，熔融的塑料通过浇口注入由凸模和凹模形成的型腔里，注射完成后两部分分开，成型的注射件由脱模机构脱出。脱模机构包括顶杆、顶出板、导柱和顶杆固定板。在随后的成型周期里，脱模机构返回到最初的位置。

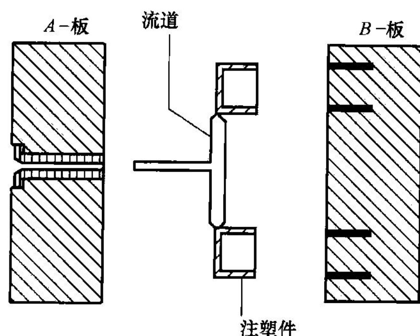


图 2-3　两板模

（1）两板模

如图 2-3 所示，大多数模具实质上有两块模板组成。这种类型的典型模具用边缘浇口成型注射件，而且流道和凹模型腔在同一块模板上。

（2）三板模

典型的三板模应用于浇口远离注射件边缘场合。此时，流道在两块模板中央，从型芯和型腔上分离，如图 2-4 所示。

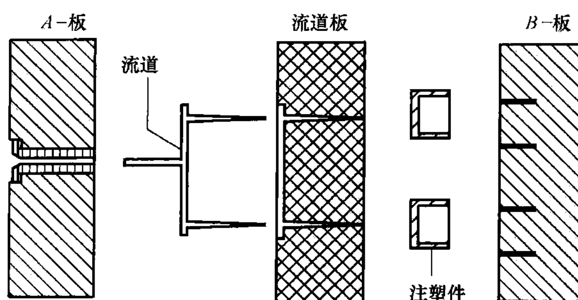


图 2-4 三板模

2.2.2 注射模具设计过程

注射模具有众多功能和多样的结构，所以设计一副注射模具是个复杂的任务。有经验的设计师的知识和技术，是设计成功的关键因素。模具设计师不仅要能正确设计成型制品形状的型芯和凹模型腔，还要让塑料熔体经浇注流道系统的注射能完全的充满型腔。各功能部件的位置和方向也要正确，以确保它们装配后能正常工作。在得到注射制品设计的全部信息之前，设计师首先要决定使用何种注射机，要考虑制件质量和模具制造成本的要求，然后布置型腔并设计流道。在最初的设计之后，再继续进行最终细节的设计，如浇口、脱模机构、整体结构及滑块、拉料杆的设计等。

为了设计好模具，在设计过程中要应用工程法则与反复试验相结合的方法。这往往要求较长的周期，而迅速变化和充满竞争的市场，却要求在很短的周期中制造出优质的模具。为了解决这个问题，CAD/CAM 被引入到注射模具的设计和制造中来。图 2-5 系统地显示了用 CAD/CAM 系统进行交互式或半自动模具设计的过程。除了最后五步不同外，其他步骤应该相同。这五个步骤没有特别的要求，可以插在任何两步之间。

（1）第一步——加载注射件造型

数据的准备工作要求设计师完成下面的工作。

1）加载注射制品模型。

2）制定模具的开模方向和比例因子。

3）创造三维容许空间。

（2）第二步——层面分布、浇口和流道设计

层面分布、浇口和流道的设计在填充设计中完成。该步要求设计师完成下面的工作。

1）定义模具的型腔。

2）在制品模型上设置浇口。

3）浇口间的流道设计。

（3）第三步——装载模架

开始模架设计的时候，设计师要用到模架模块。该步要求设计师完成下面的工作。

1）定义模架的类型。

2）选择模架系列。

3）确定模架的尺寸和其他必要的说明。

（4）第四步——分型面和嵌件的设计

这个步骤在分型设计中完成。在这个过程中要求设计师完成下面的工作。

1）定义分型面来设计型芯和型腔。

2）设计必要的嵌件。

（5）第五步——设计热流道系统

利用热流道模块来设计热流道系统，设计师需要完成下面的工作。

1）定义流道板的类型。

2）设计喷嘴和流道系统。

（6）第六步——设计滑块

对于注射件的外侧槽，设计师利用滑块模块，设计滑块或其他所需滑块滑动附件。

（7）第七步——内滑杆的设计

在内滑杆的设计模块中，设计师将按照内侧凹槽要求设计拉杆头和内滑杆。

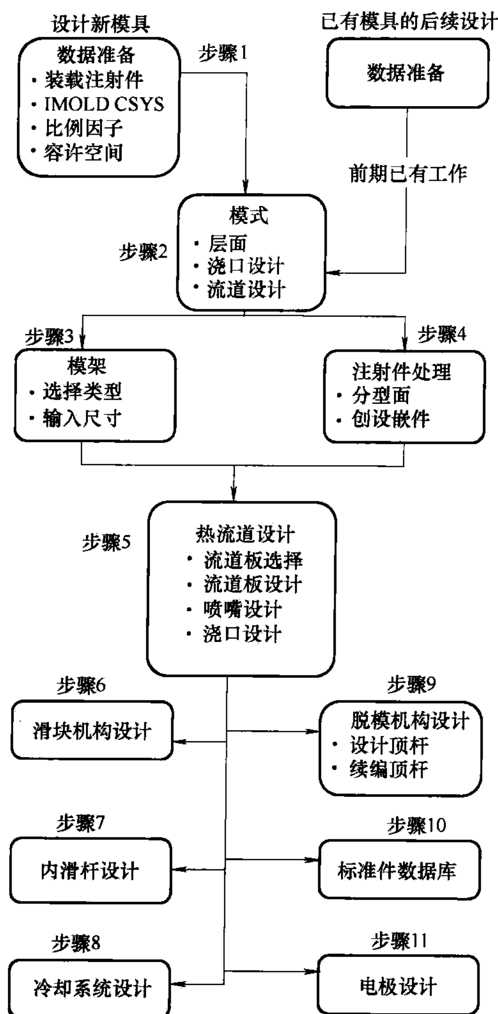


图2-5　注射模具设计过程的流程框图

（8）第八步——冷却系统的设计

在冷却系统模块中完成冷却系统的设计，设计师需要完成下面的工作。

1）为型芯、型腔凹模、模板、滑块、拉料杆等结构，设计冷却管道。

2）为冷却系统添加标准的冷却附件。

（9）第九步——注射件的脱模机构设计

这一步在脱模设计模块里面完成，在这个模块里面要求设计师完成下面的工

作。

1）定义从模具里脱出注射件所需要的顶杆。

2）按照设计需要选择不同种类和尺寸的顶杆。

（10）第十步——添加标准件

这个步骤在标准库模块里完成。设计师需要。定义并找出标准零件，如内六角螺钉和定位圈等来完成模具设计。

（11）第十一步——用于 CAM 的电极设计

这一步在电极设计模块里面完成，在这个设计模块要求设计师完成下面的工作。

1）定义电极的几何边界。

2）为电极设计装夹的固定板。

新模具的设计，要先装载注射件。然后从步骤 1 开始到步骤 10。对于已经设计的模具，也要从最前面装载，再从终止的步骤继续。

2.2.3 模具设计的要点

1. 分型

型芯和凹模在模具闭合时的分界面位置，被称为分型面或分开面[3]。模具的分型位置由模塑件上型芯和型腔界面的复合决定。模具设计师通常由注射件和客户的要求来设定分型面，以便简化模具的复杂程度，降低成本。分型设计毫无疑问是模具设计中重要的一步。图 2-6 显示了分开的型芯和型腔部分。详细的分型方法将在下面的章节中加以讨论。

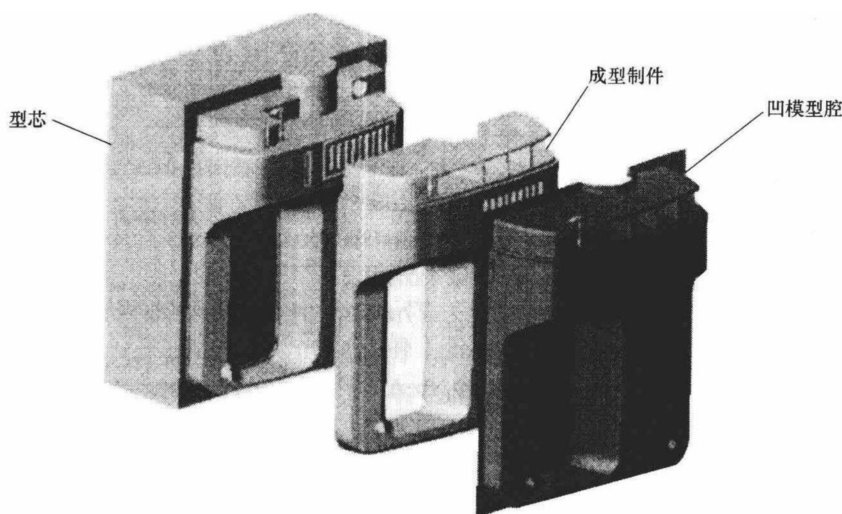


图 2-6 型芯和凹模型腔及其成型制件

2. 浇注系统—主流道、流道和浇口

浇注系统包括主流道、流道和浇口，它是模具设计中一个重要的部分。在注射模具中，熔化的塑料在流经流道后经浇口注入型腔。浇口是让其注入模具型腔的细小的通道。全部注射应包括成型注射件、主流道、流道和浇口空腔的注射。所以浇口的位置对决定塑料如何流进模腔十分重要。在选择浇口位置时，应该考虑到下面的因素[3]。

1）成型制品的美学考虑。

2）注射件上去除浇口凝料的要求。

3）注射成型件设计的复杂性。

4）模具的温度要求。

5）材料的成型工艺性能。

6）流过浇口的材料的体积和流动速率。

7）排气对填充形体轮廓结果所产生的效果、位置和影响。

在浇口设计的选项中有十几种不同的类型，包括直接浇口、侧浇口、潜伏式浇口和扇形浇口（见图2-7）等。如果设计师采用常用的浇口类型，很容易从浇口库中间选取它。CAD系统能自动或是半自动地拾取并显示它们。

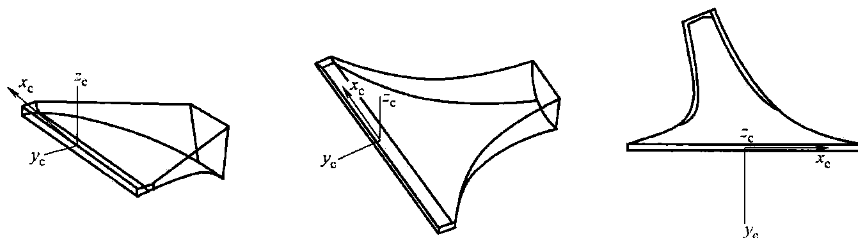


图2-7　扇形浇口的示例

流道是模具里连接模塑表面的通道。它允许注入的熔融塑料通过浇口流入型腔。流道设计模块有详细说明，包括常用的流道形状及其布置的场合等。该设计模块提供了一些基本的流道形状，如圆形、半圆形、U形、梯形和六边形等，如图2-8所示。浇注系统的表面形状、尺寸、长度和体积，对成型质量有很大的影响。对熔融的塑料流体应选择最短、最光滑、最小弯曲半径的浇注系统。图2-9所示的是一模四腔注射的浇注

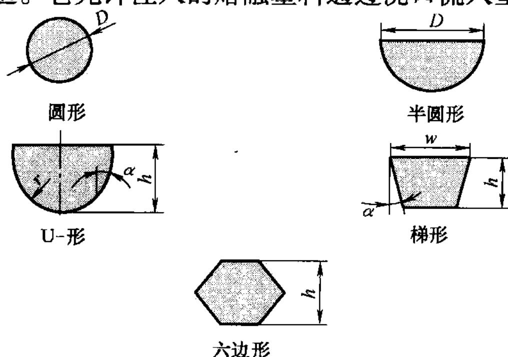


图2-8　常见的流道截面形状

系统。图 2-10 所示为一模单件和一模多腔的浇注系统示例。

3. 模架

图 2-11 所示的是整副模架的零部件。模架是模具制造者提供的主要标准零件，可根据客户的要求快速定制。模架尺寸是根据总体布局来确定的。模架尺寸必须标注公差，因为模架的模板和嵌入零件之间有一定的间隙。模具设计师根据这些要求选择最小的模架。约定的模架大小差值为 100mm。无论公制还是英制，市场上常用的模架有 HASCO（见图 2-12）、DME、FUTABA、LKM、HOPPT、STIEHL 和 NATIONAL 等。模具设计师可选择其中能满足要求的模架。模架制造商的目录和数据应适应客户的规格尺寸，保证在模架的选择方和出售方之间有很好协调。

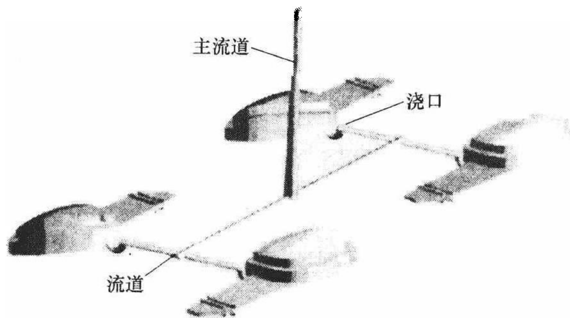


图 2-9 一模四腔注射的浇注系统

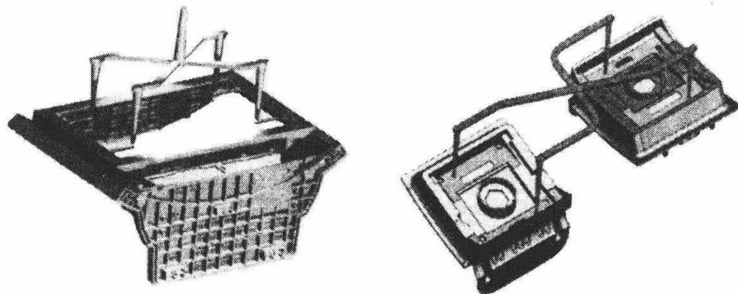


图 2-10 一模单件或一模多腔的浇注系统示例

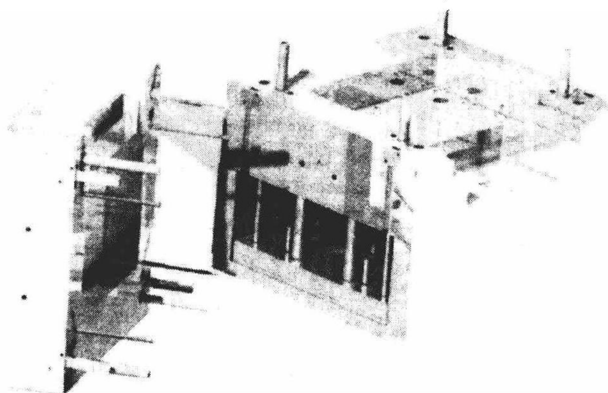


图 2-11 一副标准模架

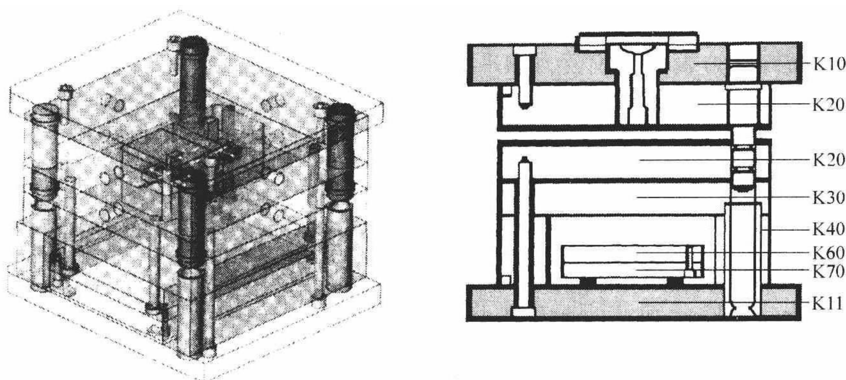


图2-12　HASCO模架

4. 冷却

模具合理的冷却系统对注射成型的质量至关重要。熔化的塑料充满模腔后固化成型时，释放的热量必须被带走。因此需要经设计好的通水管道来冷却。冷却通过一定位置的冷却管道里的流水来完成。冷却效率由热量传导率、塑料的熔化温度和成型件厚度来决定。为了达到最佳的冷却效果，冷却管道的布置十分重要，如图2-13所示。冷却管道必须精确布置，不能和其他零件，如顶杆等发生干涉。通常使用的冷却系统设计方案包括平面折回式冷却、螺旋式冷却、挡片冒泡式冷却和喷泉式冷却等。图2-14所示平面折回式的冷却系统，用于冷却截面一致的大平板注射件。

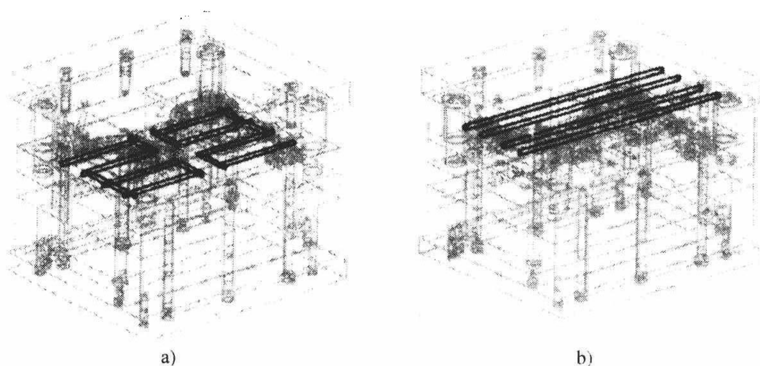


图2-13　冷却管的分布[5]
a）在型芯上　b）在型腔上

5. 脱模

脱模是注射成型循环中的主要步骤。注射循环的最后，注射模具打开时成型

好的注射件被脱出，要利用从脱模板上面传递过来足够的脱模力。模具设计师经常忽略注射件受力表面上脱模力的平衡问题。他们根据经验和简单的计算，设计确定脱模系统零件的尺寸、数量和位置。

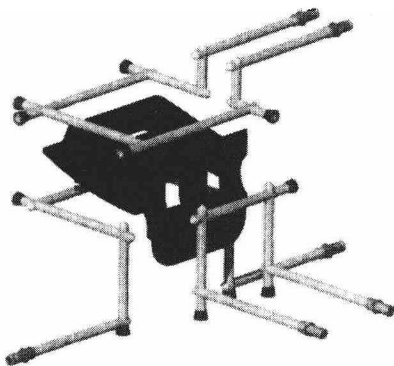


图 2-14 平面折回式的冷却系统

在成型制件冷却固化后，就要用如图 2-15 所示的顶杆和顶管等机构来完成脱模。脱模机构通常设在注射件的边角等位置。每个顶杆接触表面都应受到这样一个理想的作用力：它应大于需要的顶出力，最好等于经协调的所需顶出力。否则，注射件会粘在型芯上，或者在相应位置上变形或损坏。图 2-16 所示的是一模四件的模具脱模机构。

每个顶杆都会在模塑制件上留下可见的印迹。设计师在决定脱模位置时必须考虑到这点。不良的位置将导致明显的印痕。脱模机构设计完成后，必须对底面上的接触压力进行校核，以防止出现过深的印迹或顶杆戳穿薄的塑件。

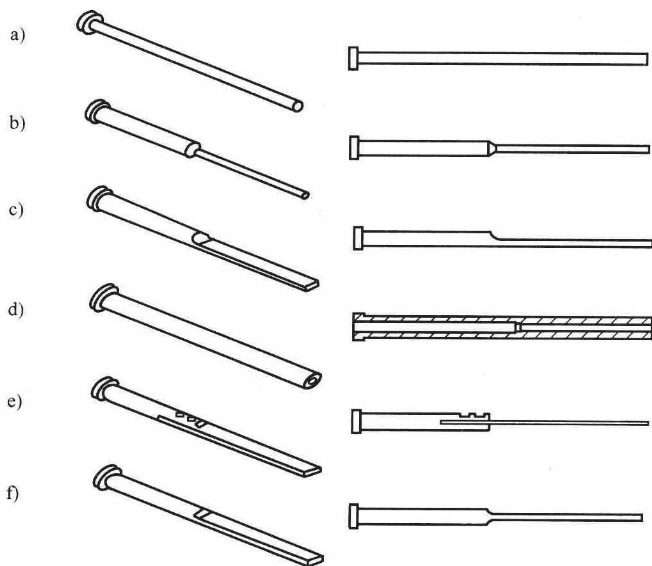


图 2-15 不同形式的顶杆[6]

a）圆柱形 b）台阶式 d）D 形状 c）套管式 e）片条式 1 f）片条式 2

因为 $$P = F/A$$

且 $$P = \frac{4SF}{\pi D^2} \tag{2-1}$$

式中 P——顶杆压强；

D——顶杆直径；

F——顶杆在底面上的力；

S——安全系数，$S=1.5$。

由此算出的接触压力与由塑料材料决定的允许压力进行比较，如果接触压力大于允许压力，就有可能出现上述的质量问题。另外，还要检查小直径杆是否受到冲击。小顶杆的破损是经常发生的，尤其是在顶出金属嵌片时。这不仅会导致注射件上出现缺陷，也会使受损的顶杆出现工件故障。

根据参考文献［7］里面的欧拉公式

$$F=\frac{m\times\pi\times E\times A}{(L/k)^2} \tag{2-2}$$

式中 F——顶杆的临界折断载荷；

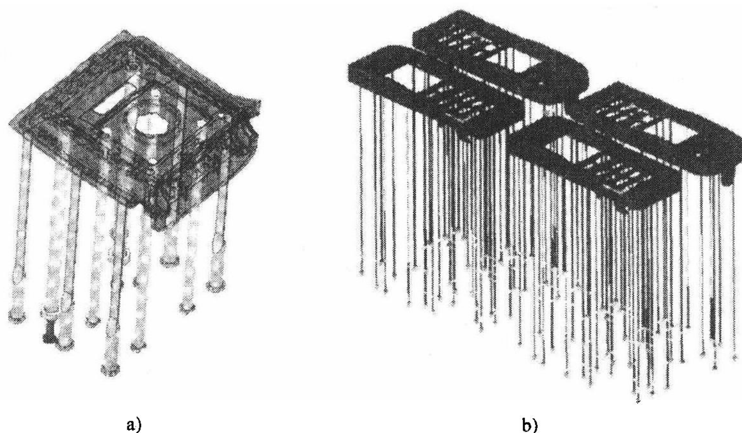
L——顶杆的长度；

E——弹性模量；

m——由支承顶杆的边界条件决定的常数；

k——顶杆截面最小惯性半径，$k=\sqrt{\frac{J}{A}}$；

J——顶杆截面的轴惯性矩。



a) b)

图2-16 一模四腔模具的脱模机构

顶杆的最大长度可用式（2-2），以受力 F 计算。合适的顶杆才能避免破碎。设计脱模机构期间，CAD/CAM 系统会给出执行界面，能自动地设计顶杆。Wang 等人[6]，已发表了有关计算机辅助顶杆机构设计的报告。报告中的系统应用平衡原理，并编入和引导认识注射成型特征，推荐优化解决方案。它也有顶杆机构

的判别功能，能校核顶杆与模具零件，如冷却管道的干涉等。

6. 滑块和内滑杆

滑块和内滑杆是用来成型制件的外表面和内表面的机构。对于那些不能直接利用凸凹模成型的注射件，成型外侧的表面要用到滑块，成型内部的表面用到内滑杆。在开模时，为了避免注射件与成型零件干涉，并损坏成型零件，滑块和内滑杆要先撤回，如图2-17所示。根据成型表面的形状，设计师首先选择滑块和内滑杆的类型，并设计它们的头部形状。然后，再设计滑块主体部分和斜导柱的模型，并决定它们的尺寸。这些参数确定之后，在滑块头部选择连接的面。此面要能够让滑块及斜导柱装入模具中，如图2-18所示。接着，设计师要为滑块设计诸如定位装置、导滑槽、耐磨压板和锁紧楔等附属零部件了。这些组件的类型是依照客户定单来选择的。在CAD环境下，模具设计师只需确定或者变更这些参数的数值，这些零部件便会自动地被装配到滑块上，型芯或型腔上面的外形能够自动地产生。内滑杆头部的形状由模塑件的内表面来确定，滑块头部依照模塑件的外表面确定。内滑杆的设计方法和滑块的设计方法是一样的。

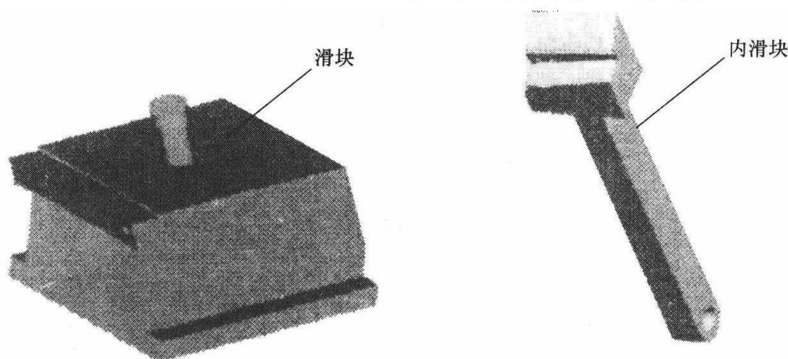


图2-17 用于成型侧向几何特征的滑块和内滑杆

7. 热流道

热流道系统常是有流道板的系统，或者被认为是流道凝料较少的成型系统。与冷流道系统相比，在热流道中塑料保持熔融状态，并不随着成型制件一起脱出。模具中引入热流道有如下优点。

1）在骤冷的浇口以上，流道中间的塑料都处于熔融状态，有助于减少注射循环时间。

2）没有主流道和流道凝料，能够节省塑料。

3）能够降低成型后，清理和去除浇口的成本。

4）在局部温度变化强烈的熔料输送中，模塑过程的充模和流动性能有较好的控制。

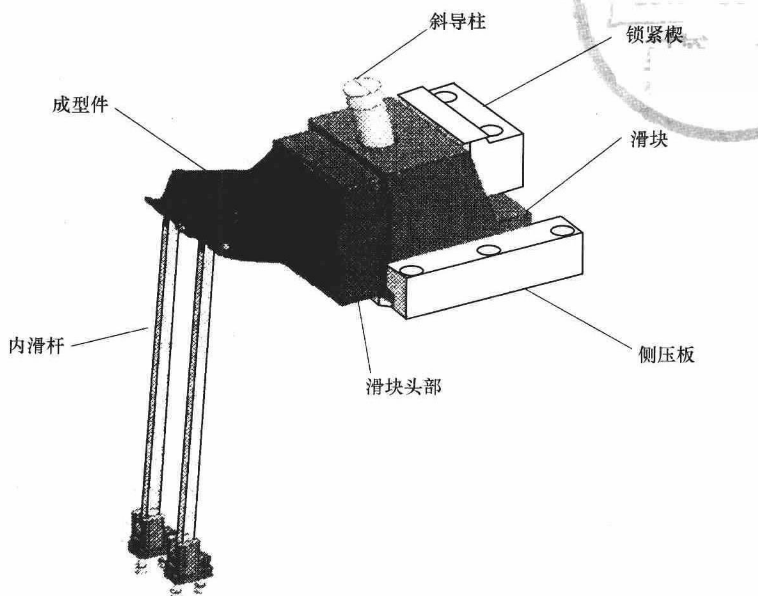


图2-18　滑块和内滑杆的装配体

典型热流道系统的主要组件，如图2-19所示。在市场上有多种热流道系统，包括单喷嘴或有流道板的多喷嘴系统。它们是由模具设计者和热流道装置制造者共同选择决定的。如图2-20所示，它们大体上还是分为三种类型：绝热型热流道系统；内部加热型热流道系统；外部加热型热流道系统。与另外两种类型的热流道系统相比较，绝热型热流道系统比较简单，而且成本低。但是它需要较短的

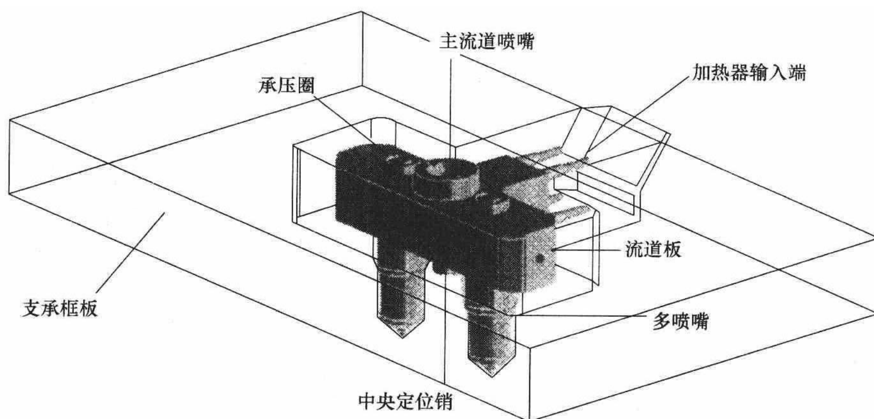


图2-19　热流道系统的主要组件

注射周期来维持塑料的熔融状态，而且容易产生不均匀的充模。内部加热的热流道系统，能够改善流道内部的热量分布，但需要更复杂的温度控制和热平衡结构，从而增加了设计难度和制造成本。外部加热系统和其他的类型相比，有较好的温度控制，但它需要考虑模具各零部件的热膨胀，这也增加了制造成本和设计的复杂程度。图 2-21 所示为单型腔的热流道注射模具的装配情况。

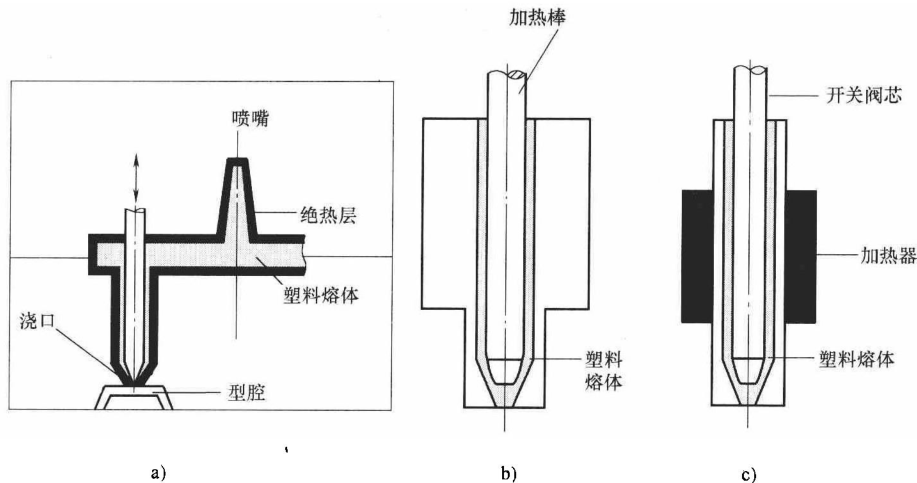


图 2-20 热流道系统的类型[8]

a）绝热型热流道 b）内部加热型热流道系统 c）外部加热型热流道系统

8. 标准件

如图 2-22 所示的标准件，包括连接件、冷却套、定位圈、主流道杯、侧挡块和支撑柱等。为模具选定各种零件后，设计师就可以将它们添加到模具装配体中间了。它们也很容易添加到预设的模架上。这些标准化组件的模型已经参数化，需要时只需要变更这些模型的尺寸参数和特征即可。

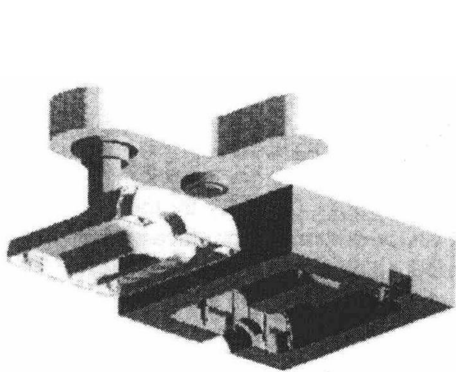


图 2-21 热流道的装配

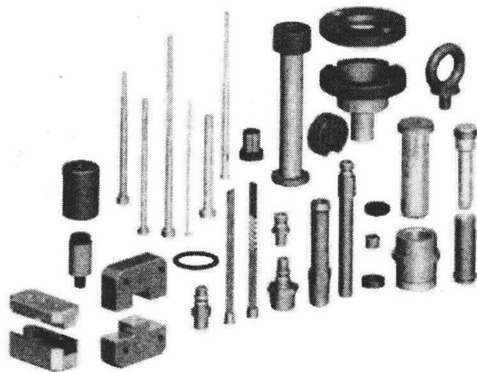


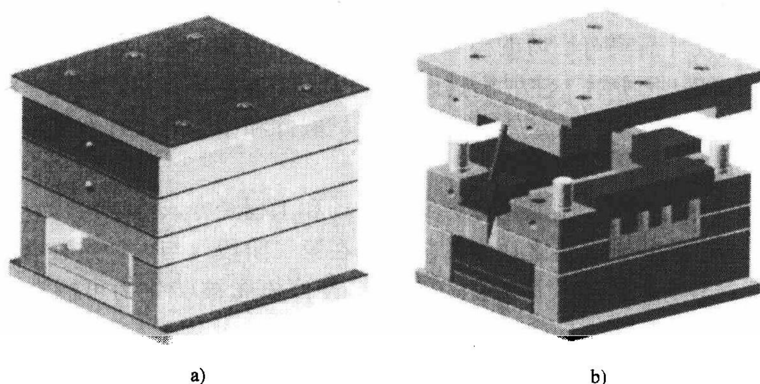
图 2-22 模具中的标准件

模具设计师使用供应商的标准件，有两个主要的原因：①它能缩短模具制造周期；②它使工具的维护更加容易。用标准件制造模具的成本低于自己设计和制造所有零部件的模具成本。其他辅助系统和机构，如冷却系统、脱模机构、浇注系统、型芯的固定件和附件等，也应该考虑低成本而采用标准件。

2.2.4　模具的装配

注射模具是由单独制造的成型零部件和相关联的机构与系统结构装配而成的。型腔的几何形状和尺寸，直接决定成型的塑料制件。因此，型腔的成型零部件是单件制造的。除成型制品的主要任务外，注射模具还要实现一些其他操作，如分配熔融塑料、冷却的熔融塑料、脱出成型制品、传递运动、导轨导向和合模导向等。不同的注射模具实现这些功能的操作模块，其设计的结构和几何形状通常是相似的。尽管尺寸会随着塑料制件变更，但它们的结构和几何形状却不必随注射件而改变。设计师选择供装配的零部件时，需要有合适的计划，并要校核尺寸和公差。

图2-23所示为典型注射模具的闭合状态和打开状态。当模具打开时，尤其在模具中有滑块和内滑杆时，必须确保所有零件和组件都没有干涉。图2-24显示了一副模具的所有零部件。如果模具设计师是在三维模具装配环境下工作，设计任务就变得更加复杂。根据模具的复杂程度，各种系统和机构的零件数目可能达数百到几千不等。现在，模具行业的大部分设计人员都已经用三维的设计方法取代了两维的设计方法。尽管如此，最后的装配和检查依然十分耗时，而且要依赖设计人员的经验。所以，在后面的章节中陈述的计算机辅助方法，将使模具的装配工作变得容易，并有利于提高注射成型制品的质量。



a)　　b)

图2-23　装配好的模具

a）模具闭合　b）模具打开

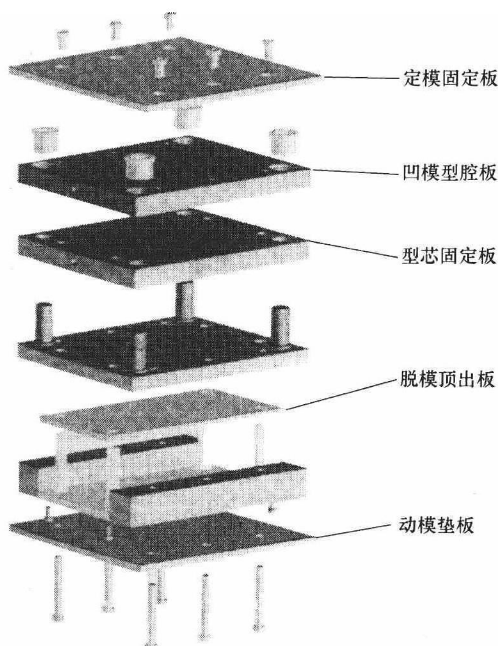


图 2-24 注射模具的爆炸图

2.3 模具的设计方法

2.3.1 模具的开发过程

新制品的注射模设计应按常规途径进行。研制周期由设计和其后制造时间决定。注射模具设计需要有广博的模具结构方面的知识和经验。开发一副新模具的典型步骤，如图 2-5 所示。注射模具设计过程可以分为五个主要阶段：注射制品设计、模塑工艺性评估、成型零部件的设计、嵌件和型腔的设计及详细的模具设计，如图 2-25 所示。

在第一阶段，一个新制品生产方案被市场和工程经办人商议推出，讨论的焦点是分析市场机遇并制定与之适应的战略。在第二阶段，与设计过程有关的制造信息被考虑，得到几何形状详细的注射件，设计概念被转化为可制造的几何形体。在第三阶段，分型方向和分型面的位置被设置，并用来检验模塑的可行性。另外，注射件形状也会被加以修正。在第四阶段，由注射件形状确定型芯和型腔，并用来设计成型零件。在这时，热收缩或膨胀量必须被考虑进来。在注射成型的可变温度下，得到尺寸和形状正确的注射件。浇口、流道、排气槽也将加上。在这个阶段，几何数据和成型信息之间的协调将是决定性的。在第五阶段，

设计该模具的整体机械结构，包括注射机和模具的连接结构，充模、冷却、脱模和模具装配等。

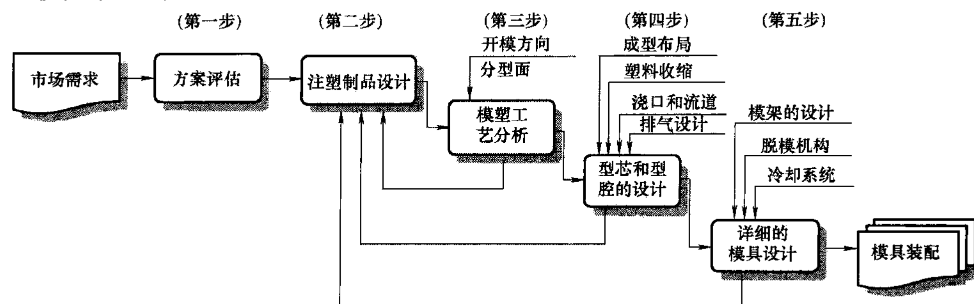


图2-25　模具的开发流程

2.3.2　自上而下和自下而上的设计方法

自上而下的设计是一种装配概念的设计方法，是指主要零部件抽象构思和期望得到的关系。设计注射模具自然应该采用自上而下的设计方法。这种设计方法，设计者从抽象的概念开始，并在设计零件时归结到合理的可装配构件。然而，大多数商业的CAD系统只支持由装配构件展开的自下而上的设计方法。在设计和布局之前，所需要的结构零、部件已经有了。为了设计注射模具，兼容的CAD系统应该支持自上而下的装配设计方法。

2.4　计算机辅助注射模具设计及装配

2.4.1　计算机辅助注射模具设计简介

模具工业中注射模具设计缺乏特定的工具支持，已经阻碍了商业CAD系统的广泛应用。近几年来，特定的注射模具设计的CAD系统已研究成功。Yuan等人[9]为注射成型开发了一个整合的CAD/CAE/CAM系统。首先，塑料制品图被交互式地转换成模具型腔图。然后，通过使用注射模具设计专用工具来完成它。依照需要，系统可以模拟塑料熔体流动过程并分析流道的平衡浇注，为金属切削或磨削确定数控加工轨迹。然而，这个系统的模块是以计算机辅助设计平台为基础的。因此，由系统提供的设计工具，实际上是编辑和产生二维图样的工具。

Kruth等人[10]为注射模具设计主持开发IMES/DSS系统。这个系统整合在AutoCAD里，并通过高级的功能模块支持注射模具设计，如基本的装配、模具零件和特征等。系统可处理低水平的CAD实体，而且允许将添加的信息，诸如加工工艺信息等编入。使用者可以创建或修改标准设计件，并通过关联数据库把

它们联系在一起。然而，IMES/DSS 只支持二维注射模具设计。Lee 等人[11]开发了知识库类型的注射模具设计系统。这个系统结合了 Unigraphics（现 Siemens PLM Software，译者注）[12]软件和 ICAD[13]系统，也包含了模架和标准零配件的设计数据库。

当模具装配或者运行功能系统时，机械装配系统包含了大量的零件。设计机械装配系统时，首先应选择构成系统的零部件，并且描述它们之间的装配关系，然后才能进行各零部件的详细设计。所以设计一个机械装配系统通常可以分为两个阶段：概念设计阶段和详细设计阶段。在概念设计阶段，重点是选择收集的组件，并将它们之间的关系描述清楚，以便在它们装配时能够提供所需要的功能。完善的几何特征描述是详细设计阶段的焦点。此时，设计师的目标是通过受制约的概念设计得到期望的性能。大量的过程分析、零件的装配和制造可行性分析等方法，能使设计最优化。常用的 CAD 系统，主要关注详细几何数据的产生和利用。因此，使用这些系统进行详细设计是很方便的。然而，它们不能对概念设计，如抽象的观念和几何形状设计、机构零部件和模具的装配与分解等提供更多的支持。因此，需要增强普通 CAD 系统的功能，以支持概念设计。

2.4.2 注射模具的装配模型

装配模型已经成为许多领域的研究课题，如运动学、人工智能学和几何建模等。Libardi 等人[15]编辑了在装配模型方面的研究总结报告，总结出了利用图表结构模拟装配布局的方案。在这个图解方案中，组件以节点的形式表示，变换矩阵之间附加弧线相联。然而，变换矩阵并不联结在一起，这将严重影响程序改造。也就是说，如果子装配被移动，所有构成它的零部件不能对应地移动。Lee 和 Gossard[16]开发了一个支持分级装配数据结构的系统。这个系统含有较多的基础装配信息，如在组件间“特征匹配”等。变换矩阵会自动导出有效的连接，但这仅描述分层拓扑模型的“部分”关系。

Mantyla[17]为自上而下的装配零件设计开发了一个建模系统。系统的以下特性在普通的 CAD 系统中是没有的：制品数据结构在一些层中是依据设计阶段来处理的；几何细节特征分为几个层次；用适宜约束机制来描述和更新几何关系。

注射模具是包含有大量零件的机械装配体。设计注射模具装配体的任务包括选择组件并确定它们之间的装配关系。另外，对几何建模功能而言，计算机辅助注射模具设计系统，也应该提供有利的设计环境来装配注射模具。这里将讨论注射模具的自上而下的设计装配模型，然后再介绍自动装配注射模具的方法。

1. 模具装配的概念设计

有两种方法可以实现模具装配的概念设计，即自下而上和自上而下的设计方

法。自下而上的设计方法，在设计模具装配体之前完成所有的构成零件和部件的详细设计。而采用自上而下的设计方法，设计者从抽象的概念开始，实现模具装配体的设计，再将它拆解成合理的机构组件，直到满足要求的零件为止。因此，自上而下这种方法较为自然适用。图 2-26 对自上而下和自下而上的两种设计方法进行了比较。图 2-26a 表示自上而下的设计过程。首先从装配概念上设计滑块机构，然后在约束条件下分解部件，进行零件的详细几何尺寸等方面的设计。图 2-26b 所示则相反，它显示了组合一系列相关联零件的过程。

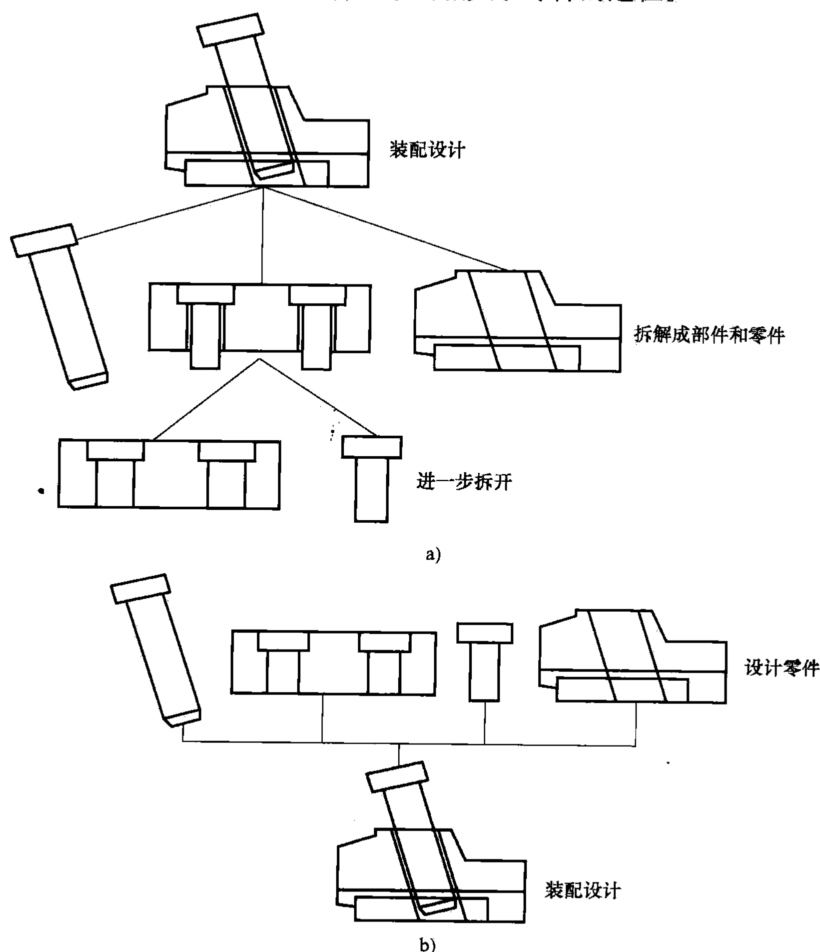


图 2-26 不同装配设计过程的比较
a）自上而下的设计过程 b）自下而上的设计过程

如 Libardi 等人[15]所述，对于计算机辅助装配设计的调查显示，当实行概念

设计时，大多数会采用自上而下的设计方法。因此，用于装配设计的 CAD 系统应该支持自上而下的方法。在概念设计的初级阶段，焦点在主要零部件的规格和被要求的关系上。这些规格可能由数字参数和公式描述。但是，非数值性质上的描述也是不可缺少的。初级阶段设计之后，从抽象的概念变为有形的实体设计，并用几何关系表述所要求的配合。最初的几何模型可能是无尺寸的，专注于主要零部件的几何配置及它们相互的几何关系。因此，要支持自上而下的设计过程，CAD 系统至少需要下列各项功能。

1）拥有设计对象进行建模的工具，如模具实体结构、相互配合关系等。

2）拥有支持创建抽象几何体的能力，设计师可以根据任务要求选择详细程度。

除此之外，为了支持自上而下的设计方法，用于装配模型的 CAD 系统也应该提供推断模具装配体中结构零件的工具。在概念设计期间，零部件之间的空间关系被指定为装配状态，用以描述装配时的位置和方向。为了得到零件的正确方向和位置，CAD 系统需要考虑该零件在世界坐标系中的数字矩阵。

2. 自上而下的模具装配设计

从图 2-1 中可以看到，一副注射模具主要包括成型零部件、浇注系统、定位导向机构、冷却系统和脱模机构。不同的注射模具有不同的成型零部件，但它们的脱模机构却是相似的，通常都含有顶出板、顶出固定板和许多顶杆等。这种情况对定位导向机构、冷却系统和浇注系统来说也是类似的。这是因为，这些系统或机构虽然尺寸会随着各种要求而变更，但基本的几何形状却不随注射件而改变。因此，浇注系统、冷却系统和定位导向机构的装配叫做制品独立的装配。它们的组成零件，则称为独立于注射制品的零件。下面将简述独立于注射制品的装配部件和其组成零件的三点重要特征。

1）独立于注射制品的装配结构是可预知的。

2）独立于注射制品的零部件的几何形状是可预知的。

3）独立于注射制品的零部件的尺寸可以在清单中被预先定义。

以 DME 模架为例[18]，能够证明上述的特性。DME 模架分为 A、B、X、AX 和 T 五种类型。X 型更进一步的分为 5 板系列、6 板系列和 7 板系列。对 A 型模架而言，它包含有定模固定板、A 板、B 板、垫板、顶杆固定板、推板、顶杆、导柱、导套和螺栓等。A 型模架预先定义了尺寸系列，如 125mm × 125mm，125mm × 156mm，156mm × 156mm，196mm × 246mm，246mm × 296mm 等。所以设计一个模架时，只要选择模架的型号和它的尺寸系列即可。

由独立于注射制品的零部件的特性，能建立适合它们的模型（将在下一部分中陈述），并能描述它们几何形状的各种特征，也能表述它们之间组合的关联性。三维模型注射模具的装配建模，自上而下的工作浏览界面已被开发。图 2-27

所示为自上而下设计的工作浏览界面。独立于制品的机构装配体设计，通过自上而下的工作界面，首先是选择装配体类型和品种，然后再选择确定的装配体主要结构。对这个主要结构，需要进一步添加更优化的零件和变更一些参数。一旦按应用“apply”键，程序自动地从数据库构建了合适的零件，并将装配体显示在屏幕上。至此，独立于制品的装配体的概念设计完成。图2-28所示为模架装配体的设计实例。

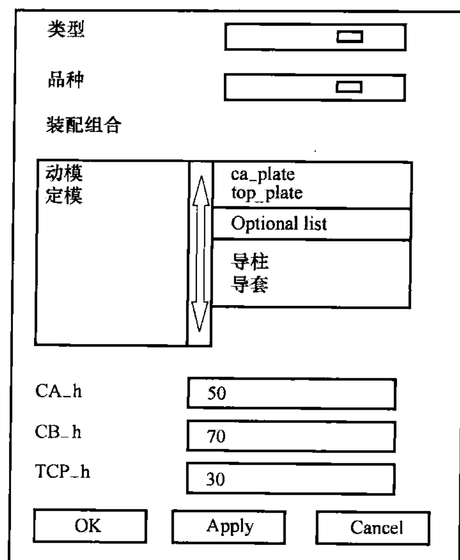


图2-27　自上而下的工作浏览界面

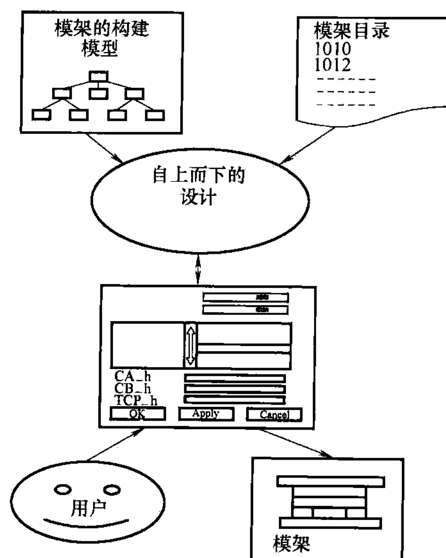


图2-28　模架装配体的设计实例

3. 自动装配注射模具的建模

前已提及，任何注射模具的装配体，都由独立于和取决于注射制品的两类零部件所组成。取决于单个制品的成型零部件，需精确地按制品的几何尺寸进行设计[19,20]。确定成型零部件的方向和位置时，通常要相对于模板认定方向，尽管它们的位置有时直接由设计者指定。而设计独立于制品的机构零部件，按常规从数据库目录中选择结构，建立几何模型，然后再添加到注射模具的装配体中。这个设计过程是耗时且易出错的。在自动或半自动的装配系统中，根据装配形式和实体的定义，用数据库建起所有独立制品的零部件。这个数据库不仅包括成型零部件的几何形状和尺寸，还包括了它们之间的空间约束关系。一些常见的功能，如干涉检查和空间范围也包含在数据库里。因此，模具设计师从界面选择成型零部件的类型，系统将会自动地计算取向和位置矩阵，并把它们添加到装配体中。

独立于注射制品的零部件，可进一步分为模架和机构系统的零部件，如图

2-29 所示。模架是一组模板、销、导套和导柱等零件的组合装配体。除成型制品之外，模具必须实现一些辅助功能，如两半模的闭合、两瓣模的分开和闭合、冷却和脱模等。大部分的模具都具有相同的辅助功能，结果就造成了相似的结构。一些模具结构适合标准化，如模架就是标准化的结果。

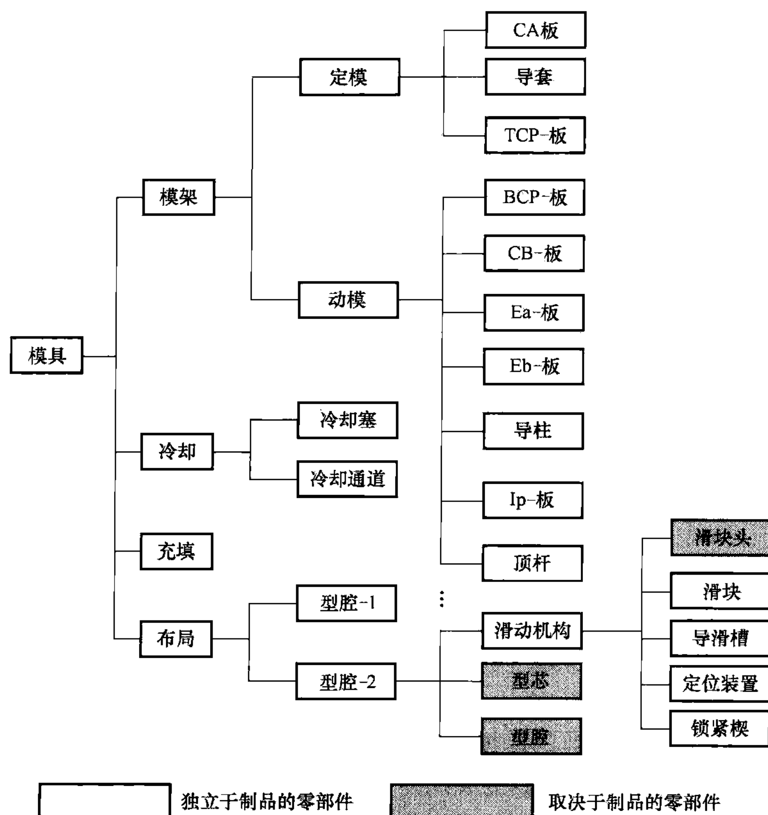


图 2-29 注射模具的装配结构[21]

2.5 综述

注射成型是一种主要用于热塑性塑料成型的技术。注射模具是个机械装配体，它通常会包含数百个零件。本章描述了注射模具的组成零部件和模具工业中通常的设计惯例。详细讨论了人工设计的系统模具设计方法。这些方法也可以应用到三维设计系统中进行 CAD 的装配设计。注射制品复杂性的增加，对模具设计师来说是巨大的挑战。这需要在尽可能短的周期里，设计出更为复杂的模具。

同人工设计相比，交互式和半自动的设计方法将使任务变得简单。不特别依赖设计师经验的全自动设计系统的开发，需要通过许多试验才能成功。在接下来的几章里，将在这些方面作进一步的讨论。

参考文献

[1] R.G.W. Pye, "Injection Mold Design: An introduction and design for the thermoplastics industry", 4th Ed., Essex, , UK: Longman Scientific and Technical Publishing, 1989.
[2] Y.S. Yueh and R.A. Miller, "Systematic approach to support design for manufacturability in injection molding and die casting", Computers in Engineering ASME Database Symposium, ASME, New York, pp. 755-765, 1995.
[3] P.S. Cracknell and R.W. Dyson, Handbook of thermoplastics injection mold design, Chapman & Hall, London, Chapter 5, pp. 42-55, 1993.
[4] HASCO, mold base catalogue, Denmark, http://www.hasco.de, 2003.
[5] Y.F. Zhang, J.Y.H. Fuh, K.S. Lee and A.Y.C. Nee, "IMOLD: An Intelligent Mold Design and Assembly System. In Computer Applications in Near Net-Shape Operations", edited by A.Y.C. Nee, S.K. Ong and Y.G. Wang. New York: Springer-Verlag, pp. 265-284, 1999.
[6] Z. Wang, K.S. Lee, J.Y.H. Fuh, Z. Li, Y.F. Zhang, A.Y.C. Nee and D.C.H. Yang, "Optimum ejector system design for plastic injection mold" International J. of Computer Applications in Technology, Vol. 9, No. 4, pp. 211-218, 1996.
[7] Amiss, John Milton, Machinery's handbook guide to the use of tables and formulas. New York: Industrial Press, 1984.
[8] Hot runner systems, http://www.scudc.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/design/runner/34000007.htm#208761, 2003.
[9] Z.S. Yuan, D.Q. Li, X. Chen, and X.G. Ye, "Integrated CAD/CAE/CAM system for injection molding", Computing & Control Engineering Journal, Vol. 4, No. 6, pp. 277-279, 1993.
[10] J. P. Kruth, R. Wilhelm, and D. Lecluse, "Design support system using high level mold objects", CIRP International Conference and Exhibition on Design and Production of Dies and Molds, Istanbul, Turkey, 1997, pp. 39-44.
[11] K.S. Lee, Z. Li, J.Y.H. Fuh, Y.F. Zhang and A.Y.C. Nee, "Knowledge-based injection mold design system", Proc. of CIRP International Conference and Exhibition on Design and Production of Dies and Molds, Istanbul, Turkey, 1997, pp. 45-50.
[12] UG-II, User Manual Version 10.5, Unigraphics, Electronic Data System, Cypress, CA., 1995.
[13] ICAD is a knowledge-based CAD system from Knowledge Technologies International, Ltd, UK, 1997.
[14] J.J. Shah and M.T. Rogers, "Assembly modeling as an extension of feature-based design", Research in Engineering Design, Vol. 5, No. 3&4, pp. 218-237, 1993.
[15] E.C. Libardi, J.R. Dixon, and M.K. Simmon, "Computer environments for the design of mechanical assemblies: a research review". Engineering with Computers, Vol. 3, No. 3, pp. 121-136, 1988.
[16] K. Lee and D.C. Gossard, "A hierarchical data structure for representing assemblies", Computer-Aided Design, Vol. 17, No. 1, pp. 15-19, 1985.
[17] M.A. Mantyla, "Modeling system for top-down design of assembled products", IBM J. of Research and Development, Vol. 34, No. 5, pp. 636-658, 1990.
[18] D-M-E Mold Base Catalogue, D-M-E Company, Madison Heights, MI: http://www.dme.net, 2003.

[19] K.H. Shin and K. Lee, "Design of Side Cores of Injection Molds from Automatic Detection of Interference Faces", J. of Design and Manufacturing, 3(3), pp. 225-236, 1993.

[20] Y. F. Zhang, K.S.Lee, Y. Wang, J.Y.H. Fuh and A.Y.C. Nee, "Automatic slider core creation for designing slider/lifter of injection molds". CIRP International Conference and Exhibition on Design and Production of Dies and Molds, Turkey, 1997, pp. 33-38.

[21] X.G. Ye, J.Y.H. Fuh and K.S. Lee, Automated assembly modeling for plastic injection molds. International J of Advanced Manufacturing Technology, 16: pp. 739-747, 2000.

第3章　模具智能设计和装配

3.1　概述

注射模具设计是高智能的慎密思考的过程。模具设计师从设计大纲，即从塑料制品开始构架模具，正确严密地考虑模具所必需的零件。为了替代传统的CAD系统所提供的低水平几何实体，设计师要将模具要达到的功能和动作集中起来。为了给模具设计师提供有利的环境，注射模具的CAD系统需要支持高级的实体设计。

注射模具设计也是复杂，且不断重复的过程。在这个过程中不断的更改和修正是必要的。一方面，在基于几何实体的CAD系统中，低水平的模型不能支持设计师的构思，模型和实体之间缺乏关联，更改设计必然牵涉到低水平实体的改变，因此很耗时。另一方面，即使用高级和有效的实体建模，注射模具的结构设计也不会是简单的。建模环境支持重复使用储存的零部件，是十分重要的，比如标准零件和常用机构在新设计中的重复应用。重复使用现有零件，要求CAD系统能够方便地修正当前的设计。用于注射模具的CAD系统，应该能够自动将局部变更扩展到全部模型中。

在近20年，CAD/CAM技术在模塑行业得到了广泛的应用。现有的商业CAD/CAM系统能够帮助模具公司提高模具质量，并缩短生产周期。然而，这些系统通常只是普通机械的CAD/CAM软件，不能为注射模具设计提供特殊的功能。对模具设计师而言，这些CAD/CAM系统只是产生和编辑二维图样的工具。现在，塑料制品的开发不再是封闭的连续过程。许多公司在产品开发阶段就以最终的塑料制品来设计注射模具。这要求CAD系统提供强大的功能，来修改和调整注射模具的设计方案。而且不只是为模具设计提供特殊功能，既能支持高级实体设计，又能支持更改和扩展设计。为此，有开发计算机辅助注射模具设计系统，CAIMDS的必要。

本章将回顾注射模具自动化设计研究发展的成就，并讨论其关键技术。关于计算机辅助注射模具设计的研究工作可归纳为以下三点：定义塑料件的最佳脱模方向；通过分型自动创建型芯和型腔；为注射模具设计开发一个交互式的CAD系统。可是，计算机辅助注射模具设计的一些关键问题的研究和开发，如在计算机上表示三维的注射模具、多型腔的自动布局和注射模具的装配建模等，很少有

报道。注射件的侧向凹凸成型面在注射模具设计中是一种成型加工特征（undercut features）。从塑料件上有图案和标记的雕刻面上，识别深度方向的成型特征是对现有特征识别技术的挑战。总体建模装配表明，更高效发展注射模具装配设计意义重大。

3.2 基于特征和关联的注射模具设计

传统的CAD/CAM系统的本质是实体建模或基于表面的模型。实践已证明，其对注射模具设计而言是有缺陷的。下面将讨论基于特征和关联的计算机辅助模具设计方法。这将解决基于几何体的CAD系统设计注射模具所面对的问题。在简要介绍特征的概念和创建特征的技术之后，将深入讨论特征及它们与注射模具的关联。用于三维注射模具的定向实体的设计方法，能描述包含在装配体中的特征和关联信息。

3.2.1 特征建模

1. 特征的概念

从工程角度，特征意味着零件或装配体的形状或特性。工程师通过它，可以联系有用知识和属性来构思零件或装配体。因此，特征与零件或装配体的物理和几何方面有关。从一个或更多的工程观点来说，有效且清楚的实体才有意义。特征可以被定义为以下几个方面：

1）特征是零件的一个物理因素。

2）特征可以被变换成通用的形状。

3）特征具有重要的工程意义。

4）特征具有预定的性质。

特征建模是用零件或装配体特征组成的一组数据集合。特征模型中的每个特征，都是确定实体的直接表述。特征的形状可以表述为一组尺寸参数、几何和拓扑实体及关联的数据。特征的工程意义在于提供特征或特征生成的格式化的功能。

在简单讨论了特征的基本概念之后，将转入讨论特征在解决低级实体、设计意图校核及几何体的表面模型等问题。特征的主要优点是基于特征的零件模型能使用一些高级的基元，并可定义成可分离和再生的形状。特征的开放和闭合的性能，使得它能正确应用在一些范畴。对于加工零件、槽、基座和孔等，均能被定义成切削特征。对注射模具而言，侧凹槽也能被定义为成型加工特征。随着高级实体的使用，设计师可以将精力集中到功能描述和动作设计上。所以实体设计可以将高级实体和它们的关联迅速综合起来。

设计由应用实体来描述，特征建模比几何建模更加清楚地向设计师提供了一个更好的记录。特征为模型和设计推理之间提供了联系的基础，所以它也支持变更和修改。

2. 特征的创建技术

基于特征的模型创建技术，可以分为两大类：特征识别和根据特征的设计。特征识别技术的特点是从几何模型中提取并识别特征。这种技术分成互动和自动特征识别两种。在交互式特征识别系统中首先创建几何模型，接着由用户在零件的影像上拾取实体。而在自动特征识别系统中，部分几何模型将与预设好的特征模式进行比较。自动特征识别的次要任务概述如下[2]。

1）装配来自几何学模型的附加数据结构，促进特征的搜寻。

2）寻找几何学模型的相配拓扑和几何学模型。

3）提取来自几何模型的识别特征。

在所有的基于特征的设计技术中，创建零部件时直接使用特征。而且几何模型从特征产生，需要 CAD 系统在特征库中给予特征定义专门的参数和位置参量。可参考特征的定位和各种其他属性。

3. 注射模的特征

一般而言，特征表达零件的几何含义和/或工程的含义。特征能被定义成工程术语而应用，如加工平面、NC 数控机床、检验和模具设计等。对于注射模辅助设计系统，重要的是在注射模设计方面给特征以明确的定义。

注射模设计的主要任务是将塑料熔体填充到注射模的型腔里，并使其成型为制品的形体[3]。型腔的几何形状和尺寸是由注射件决定的。以型腔形体的设计来定义基本的形体特征是不现实的。因为大量塑料制品的几何形体复杂多变，需要繁重的造型。然而在塑料制品里有一些专门的部位，可引起模具设计人员的兴趣。例如其中的凹槽部位，要从注射件上移一块实体到注射模上，凹槽加工部位在很大程度上影响注射模的制造。因此，同时定义了凹槽部位作为设计的特征。在特征认知技术帮助下，凹槽加工部位特征能自动识别塑料制品、型芯与型腔。

除了成型零部件外，注射模中还有一些相关的零部件完成次要功能，如熔料分配、塑料熔体的冷却及制品脱模等。这些功能零件，通常已被模架供应商和模具公司标准化。模具设计者只需从数据库中选取所要机构和相关零件的几何形体，并依照注射件调整它们的尺寸即可。因此，还要定义一组形体特征，允许高水平实体来设计标准化的功能零件。在以上讨论的注射模范围内，特征被定义为两类：凹槽成型加工部位特征和基本形体特征。

（1）成型加工特征

注射件件上的凹陷和凸出区域的实体，被当作从注射模上移到注射件的切槽

特征。切槽特征能进一步区分成凹陷成型特征和凸起加工特征两类。凹陷特征是凹形面组合的区域和凸棱环绕的表面。相反，凸起特征是凸起组合和凹槽环绕面。成型切槽特征的区域，需要侧向型芯。它还要与一些附属零件一起，完成侧向滑动。注射件上可见的各种切槽特征，在注射模里都有相对应的区域。它可对照注射模上的切槽特征。图 3-1 说明了注射件上及其注射模里的切槽特征。塑料制品上的凹陷成型特征，必然在注射模里存在与之相对应的凸起特征。

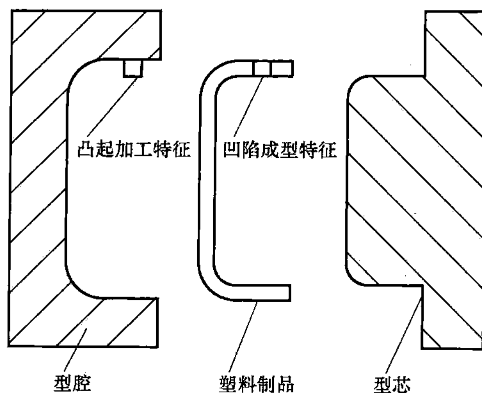


图 3-1　成型加工特征

(2) 形体特征

分析了注射模上的标准功能零件之后，一组形体特征可被设计者用来拾取设计零件的条目。它们是矩形体、圆柱体、单孔、台阶孔、埋头孔、凸台、矩形壳体和矩形凸台等。设计注射模时，这些形体特征被用来建立独立于制品的零部件，诸如板、导套和导柱等。表 3-1 列出了这些形体特征的参数和定位方法。图 3-2 说明了它们的几何形体。

表 3-1　注射模设计的形体特征

形　体	参　量	定位方法
矩形体	长 l、宽 w 和厚 t	世界坐标系
圆柱体	直径 d 和高 h	世界坐标系
单孔	孔直径 d、孔深 h 和底锥角 α	相关平面和孔轴线
台阶孔	孔直径 d、孔深 h、台阶孔直径 D、台阶深 h_1 和底锥角 α	相关平面和孔轴线
埋头孔	孔直径 d、孔深 h、埋头孔直径 D、埋头锥角 α_0、底锥角 α	相关平面和孔轴线
矩形壳体	长度 X、Y、Z，内周角半径 r_c，底半径 r_f	相关平面和定位边
凸台	直径 d、高 h 和锥角 α	相关平面和定位轴
矩形凸台	长度 X、Y、Z，周角半径 r_c	相关平面和定位边

3.2.2　注射模具的装配

1. 装配特征

众所周知，特征的主要功能是在定义零件的实体间创建装配体。为使实体间的装配可行要节略设计或设定约束，并在各种工程应用中作出几何体所需的推断。特征表述编码的装配体，能进一步分成内部特征装配体和内置特征装配体。

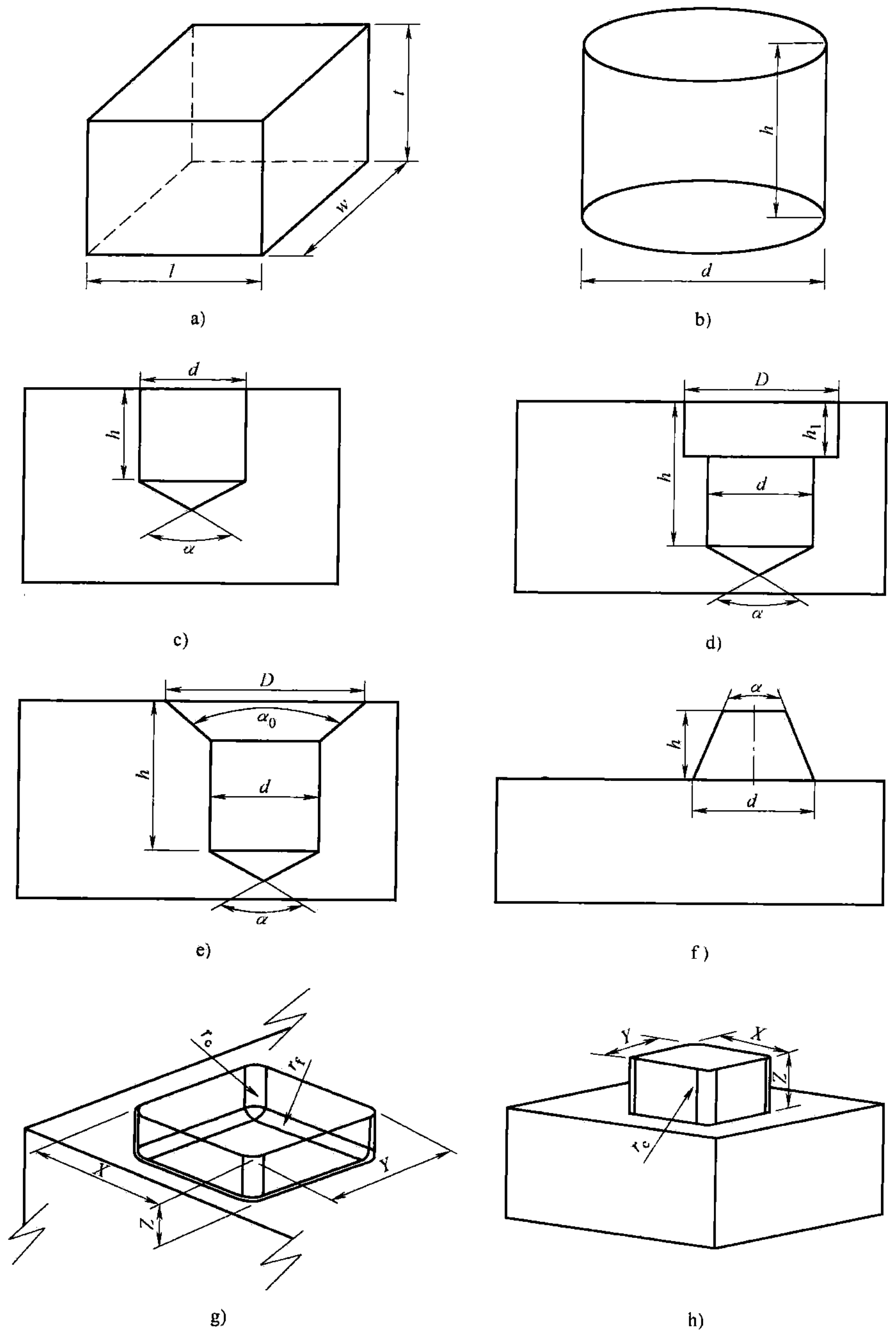


图3-2　形体特征[4]

a）矩形体　b）圆柱体　c）单孔　d）台阶孔　e）埋头孔　f）凸台

g）矩形壳体　h）矩形凸台

（1） 内部特征装配体

内部特征装配体是些编码属性的特征表述。用于描述其独立于模具的其他特征及其实体之间的关系特征。内部特征装配体有以下两种：

1） 几何形状的约束。

2） 独立参量。

几何形状的约束用特征描述几何实体之间相互关系，特征创建时，独立参量同时赋予专门的参数。

（2） 内置特征装配体

内置特征装配体也是些编码的属性的特征表述。这些编码描述了特征之间的关系。内置特征装配体有以下四种：

1） 作用的特征参量。

2） 特征定位。

3） 特征方向。

4） 特征尺寸、定位或方向参量的约束。

新特征添加到模型时，它的参量或参数可用其他特征确定，称为作用参量或作用参数。图3-3a上表述的凸台直径 d，被称为作用参量。图3-3b表述了尺寸约束。此图上 t_1 是台阶孔深，应该是板厚 t 与孔深的差值。

特征应有位置和方向的信息，因此需要给特征定位和取向。通常，新特征的方位关系到实体或特征的存在。应该用更合适的专门途径设置特征，给实体定位。特征能用媒质记录，因而可在其他场合重新使用。几何实体使用在定位特征中，被定义成一种装配体。因此，当特征被修改或删除时，变更能传送到接近的和起始的特征。

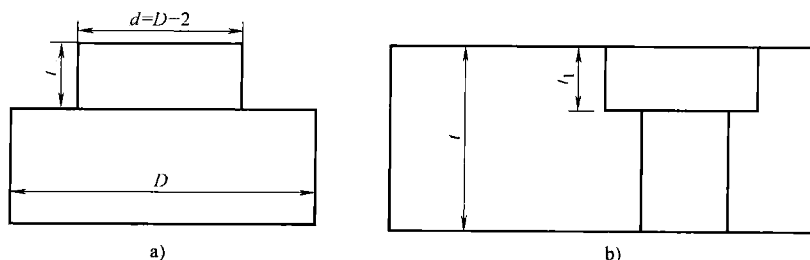


图3-3 内置特征装配体

2. 零件级的装配体

除了内部特征装配体和内置特征装配体外，还有在注射模的各个零件之间的装配体。在设计注射模时考察零件之间重要的规律，零件级的装配体实体之间有本源起始关系、空间关系和几何联系三种关系。

（1） 本源起始关系

本源起始关系描述在装配体的零件间的类同。次级的装配体可由许多零件组成。一些次级装配体又被构成新的装配体。零件的生成取决于它的本源起始参量的存在和调用。

（2）空间关系

相对另一个零件，在两个零件的空间描述零件的定位和取向。修改参考零件会波及相关零件。空间关系能分入两个数据库，称空间性质关系和空间数量关系。空间性质关系定义为两个物体之间的几何和拓扑约束。而空间数量关系用矩阵描述两个零件之间的空间关系。

（3）几何联系

零件实体之间的几何联系，能描述不同零件的几何实体的装配。成型型腔的形状和尺寸则直接由塑料制品决定。所以，塑料制品的任何形状和尺寸的变更，均应被反映到成型型腔中。图3-4a说明了注射件及其型芯与型腔。当注射件变更时，它与型芯/型腔之间的几何联系，能导致如图3-4b所示的型芯/型腔的形状改变。塑料制品实体与它的成型型腔之间的几何连系，提供了按推理修改设计的基础。

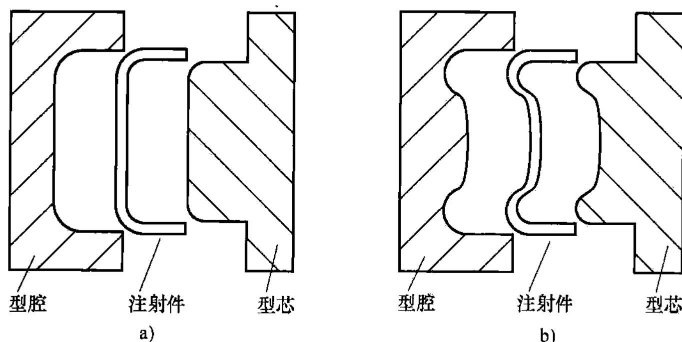


图3-4　几何联系

3.3　注射模装配的表述

注射模装配表述的根本的问题在于目前正在开发的计算机辅助注射模具设计系统信息的表述，不仅包括的注射模的几何和物理性能，而且还有关于功能、限制条件和设计理念的信息。在本节中，以面向对象的方法作为基础，来表述注射模具的信息。

3.3.1　面向对象建模的概念和要点

面向对象建模是一种思考问题的新方式，要点是按照实践理念来组装模

具[5]。基本实体对象是指结合了参数结构和状态特性的个别实体。以下是面向对象建模的一些基本概念和要点。

（1）对象

对象被定义为概念，既抽象又具体，对遇到的问题有清楚的意义和范围。对象的描述有两个目的：其一，使我们对真实世界有一定理解；其二，它为计算机软件的开发提供了实践基础。所有的对象都有其普遍性和特殊性。

（2）类别

类别是描述有着类似性质（属性）、共同行为（活动）或与其他物体有着共同关系以及有共同语义的一组对象。对象的类别是有抽象机理、共同属性和明确语义的。

（3）运算

运算是对某类对象通过函数或转换式的计算分析。每次运算都有目标对象作为隐变量。每个对象都“知道”它自身的类别，因而可以对运算进行正确的操作。

（4）联结和联系

联结是两个对象实体之间自然的或概念上的连接。联系描述一组有着共同整体性和共同语义的对象。联系的最重要特性是其多样性，可以指出某对象可涉及多少其他相关种类的实例。多重性制约了相关对象的数量。通常的联系可以是一对一、一对二或一对多，所以多样性常常被描述成“一级”、“二级”或“多级”。图 3-5 表示了联系的多样性。更多有关面向对象建模的要点，可以在 Rumbaugh 的专著[6]中找到。

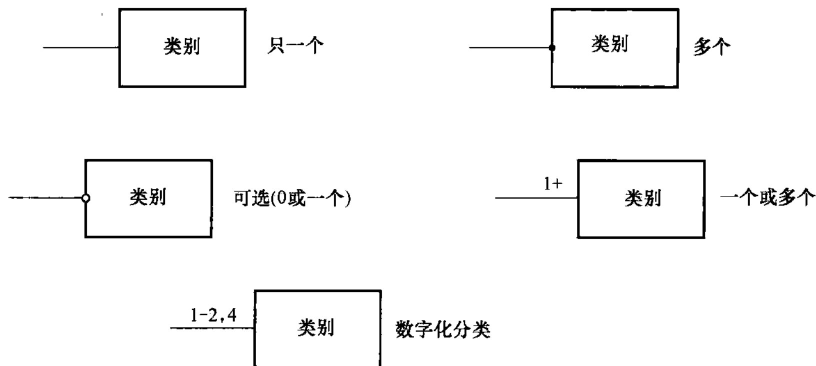


图 3-5　多样性的注释[6]

3.3.2　模具装配对象的引导

众所周知，注射模都由一些零部件组成。大的部件由小的零部件组成。零件是最小的组成单位。在描述注射模对象时，所有零件和特性都作为对象。作用的观念和物体，都提供各种不同程度的抽象模式。这些对象联系的方法有以下技巧：

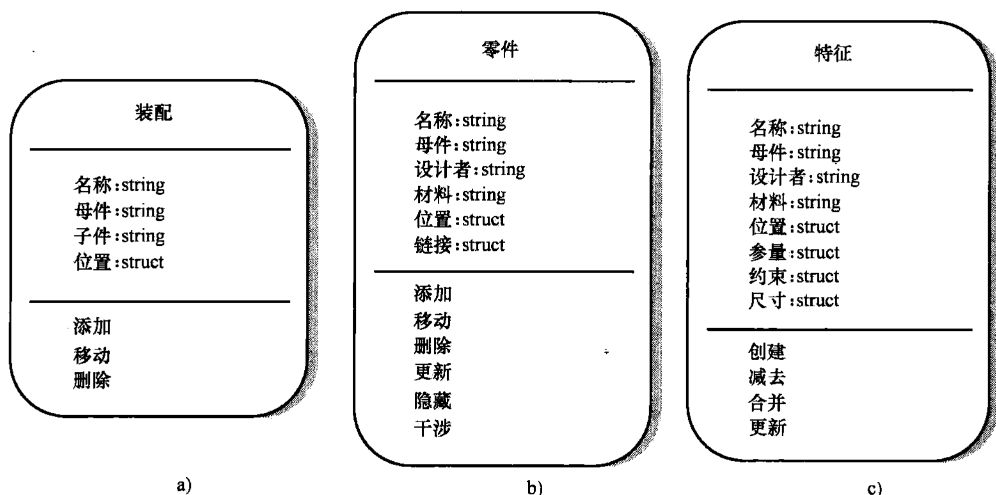


图3-6　属性分类

a）装配类别　b）零件类别　c）特征类别

1）履行程序上的计算。

2）估量一些效应的含义。

3）提供约束手段的辅助。

4）提供多种可用的功能。

对应对象的三个普通类别可以被界定为装配类别、零件类别和特性类别，如图3-6所示。三种类别的关系，如图3-7所示。

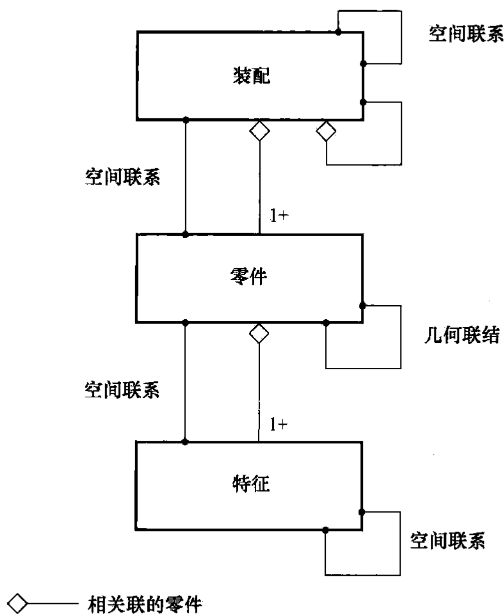
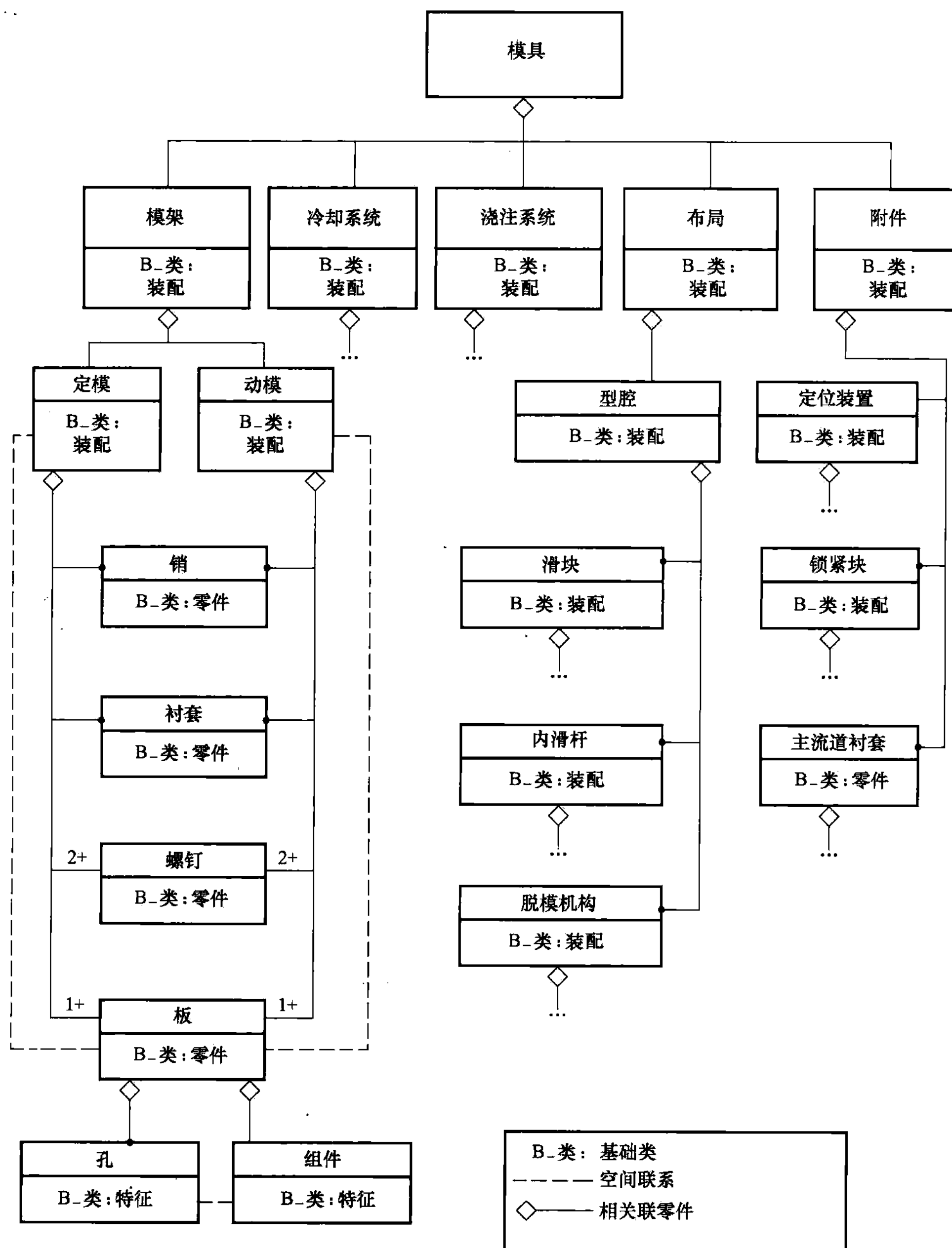


图3-7　属性分类之间的关系

注射模的常规分类中，有更多的次级分类，诸如板、型芯、销和螺钉等，而且还能进一步衍生。举例来说，次级的板类可再分成各种零件。次级的板类零件有长度、宽度和厚度三个特征。用这些次级分类，注射模的概要表达在图3-8上。



模具
模架
B_类：装配
冷却系统
B_类：装配
浇注系统
B_类：装配
布局
B_类：装配
附件
B_类：装配
定模
B_类：装配
动模
B_类：装配
型腔
B_类：装配
定位装置
B_类：装配
销
B_类：零件
滑块
B_类：装配
锁紧块
B_类：装配
衬套
B_类：零件
内滑杆
B_类：装配
主流道衬套
B_类：零件
2+
螺钉
B_类：零件
2+
脱模机构
B_类：装配
1+
板
B_类：零件
1+
孔
B_类：特征
组件
B_类：特征
B_类：基础类
空间联系
相关联零件

图 3-8　注射模概要图

3.4 型芯和型腔的优化设计

对于注射件的成型加工特征的认识和分析，自动提取最佳分型开模方向、分型线和分型表面的研究，在20世纪90年代以前是相当有限。早期，受到注射件几何体的复杂性和有限的计算能力的制约，虽然在90年代后取得了一些进展，但是工作仅限于用棱柱特征和平面特征分析构建简单的注射件。

在注射模具中，成型加工特征的存在会影响模塑成本、模具的分型开模方向、分型线和分型表面、局部装置的数量和其他工作机构、型芯/型腔和它们的嵌件等。前述的加工特征的影响，可以概括为以下几方面：

（1）分型开模方向

为了简化模具结构，降低模塑成本，优化的分型开模方向应该是加工特征出现和对应体积最大的方向。而其它方向出现的加工特征和对应体积最少。其他的加工特征将成为实际的侧向凹槽，需要用侧型芯、侧滑块和其他局部装置模塑建模。加工特征是否能用型芯或型腔来成型，取决于成型特征的参量。如果加工特征的方向和分型开模方向一致，则加工特征可以利用型芯/型腔及它们的嵌件模塑。否则，就要用其他局部装置。

（2）分型线和分型表面

通常分型线和分型表面垂直分型开模方向，是模塑投影面积最大的面。分型线和分型表面应包括尽量多的加工特征，尽量减少侧型芯或侧型腔的数量。如果分型线和分型表面包括太多的加工成型特征，将使建模将变得很复杂，所以要采用折衷的方案。设计原则是分型线应该包括尽量多的成型特征，而分型表面要尽量有利于加工制造。

（3）侧型芯和侧型腔

侧型芯通常是以一定角度安装在分型开模方向上的局部嵌件，用以成型注射件的侧面。侧型芯阻碍了注射件从开模方向脱模，因此必须采取一些方法，使侧型芯在注射件脱模前抽离。侧型腔有与侧型芯相似的功能，它使注射件侧面突起的部分成型。在模塑时，如果加工特征表现在相同的特征方向，并在恰当的位置，它们就可用侧型芯或侧型腔来模塑。

3.4.1 最佳分型方向

1. 分型开模方向

分型开模方向是指型芯和型腔反相分离的方向，$\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}$ 是分型开模方向，而 $-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}$代表与之相反的方向。Chen、Chou 和 Woo[7,8] 认为，分型开模方向是基于三维模塑壳体的视图（V-图）确定的。图3-9所示为三维模塑的壳体、剥离的壳

体和外壳。假设壳体通过 $CH(Q)-*Q$ 引出 $P=[P_1,P_2,\cdots,P_m]$，用 $VM=[V_1(P_1),V_2(P_2),\cdots,V_m(P_m)]$ 描绘相应 V-图，并虚拟成非空状态。分型开模方向位于一对反相的点 p 和 $-p$ 上。不管是 p 点还是 $-p$ 点，在 V-图的球体中包含的 V-图多边形数目最多。换言之，分型开模方向已经包含了尽可能多的成型加工特征，以至于剩余成型加工特征数量已经是最少了。对于图 3-10 中所示的壳体，分型开模方向是根据其 P_1、P_2、P_3、P_4 的 V-图来确定的。与分型开模方向 $\boldsymbol{P}_D$ 反相点，使 V-图多边形 V_1、V_2、V_4 和 V_3 的数量最大。但不包括侧型芯需要模塑的壳体 P_3。

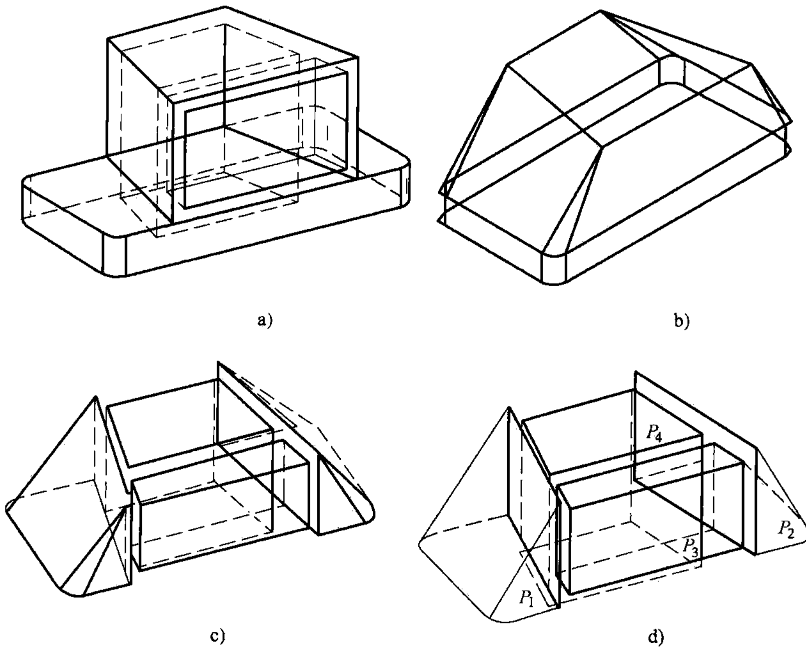


图 3-9 壳体和相应的剥离[7]

a) 三维模型 b) 外壳 c) 相应的剥离壳体 d) 壳层

Mochizuki 和 Yuhara[8]应用了与 Chen 类似的原理[7,8]。所有可能的特征方向和分型开模方向都取决于潜在的成型加工特征。开模方向应该取在成型特征数量最大的方位。Chen 和 Mochizuki 在决定开模方向时，不考虑加工特征的体积。在实际的模具设计中，特征的体积是影响分型开模方向的非常重要因素，考虑不周而且也会造成设计工作的主要弊端。Hui 和 Tan[10]引入了阻塞因子。用预测某方向上被阻碍的相关量，来表示成型特征的数量。阻塞因子是测试点总数与模糊点数量的比率。阻塞点是不能从指定方向看到的点。先计算平行于开模方向的所有

边界轮廓，以进行阻塞因子评定。一些测试点是在边界轮廓和其他模塑轮廓上产生的。如果在给定方向上看似模糊，边界上的每点都要被测试。另一参量也可引入来决定分型开模方向，称为优先值。它被定义为指定方向上投影面积与模塑中任意方向的投影面积最大值的比率。高的优先值反映了较大的投影面积，因此可以作为分型方向的首选。在获得阻塞因子和优先值后，分型开模方向便可以确定了，考虑了阻塞因子和优先值，就可对所有可能方向进行评定了。

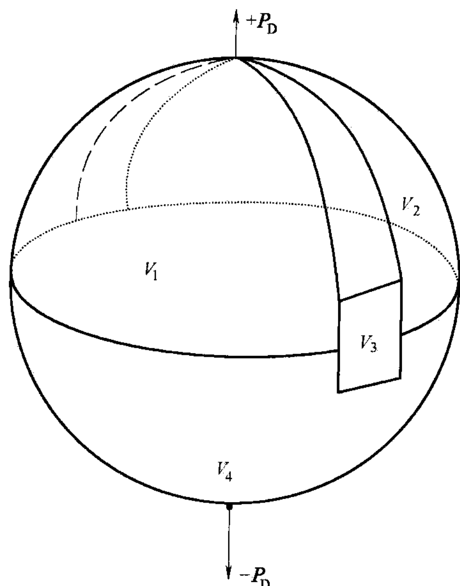


图3-10 V-图多边形和分型开模方向[7]

Besides Hui 和 Tan，Weinstein 和 Manoochehri[11,12] 介绍了他们的定义，以模塑的部分几何体的凹凸区域，来确定分型开模方向。凸起表面是指在此区域两端不能彼此看到的表面。相反，凹腔是指这区域两端可以看到彼此的表面。每个凹腔的允许图形范围是根据该区域表面的V-图来确定的。此时，型芯和型腔的分型开模方向由可抽离凹模区域的截面决定。此方法有三个步骤：第一步为每个凹腔找到可抽离区域；第二步为凹腔确定抽离区域，能从整体中抽出单个物件；最后一步是找到可抽离凹腔区域的截面，决定最终抽离形式。但是，这种方法不能应用于凸起抽取。凸起区域，如凸台、圆柱形、圆锥形和球形等，在建模过程中将成为真正意义上的加工特征，并影响成型开模方向。另一个不足是没有提到如何确认注射件上有凹腔，凹腔也可以由曲面或自由表面形成。有时，建模单个表面是由凹腔区的锥孔、凹球特征所形成的。

CAIMDS 有个重要功能是分型开模方向的自动选取。当然，在先期工作中一些方法不包括所有的几何特征，还有些局限性。模塑制品的几何形状只限于平面或简单的曲面造型。在注射模自动设计中，所有这些方法都是开拓性的工作，都有待进一步的完善。

2. 最佳分型开模方向

最佳分型开模方向 $\boldsymbol{O}_P$ 是根据主型芯/型腔建模的成型加工特征或用成型特征数目的最大值来确定的，参见3.6节详解。成型特征数目最小值只能用侧型芯等的建模。但是，以下[13,14]的近似描述不但要考虑成型特征数目，还要考虑它们的相应体积。如果 x 方向选作为分型开模方向，用不平行开模方向的成型加工

特征建模，将会使真实的加工成型需要局部装置。

为了确定最佳分型开模方向，可将所有的成型加工特征分成不同的组，并使每组都有不同的分型方向。成型分组如图 3-11 所示，表示该注塑件有三个成型特征。成型特征 2 和 3 有着同样的分型方向，它们被分在同一特征组里。成型特征 1 不同于 2 和 3，所以它自成独立一组。假定 $V_{ij}(x_i)$ 是属于 i 组的 j 成型加工特征，x_i 是其所在组的成型方向，最佳分型方向 $\boldsymbol{O}_{\mathrm{P}}$，是基于以下判别式（3-1）选定[15]。

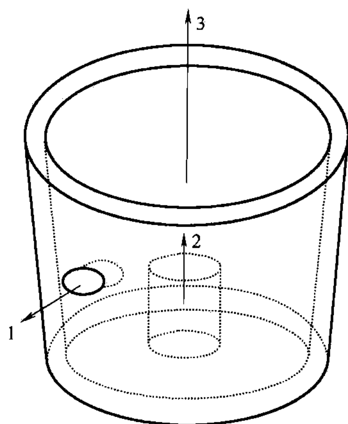


图 3-11　成型加工特征组

$$\left.\begin{aligned} &\boldsymbol{O}_{\mathrm{P}} = x_i \\ &if_and_only_if \\ &V_{i\max} = \underset{i}{Max}\left[\sum_{j=1}^{m_i} V_{ij}(x_i)\right] \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned}(i &= 1,2,\cdots n, \\ j &= 1,2,\cdots m_i)\end{aligned} \tag{3-1}$$

式中　n——成型特征组的编号；

m_i——i 组中成型加工特征的编号。

成型方向 x_i 要满足上述判别式，才能成为最佳分型开模方向 $\boldsymbol{O}_{\mathrm{P}}$。基于以上标准，用主型芯和型腔建模的最佳分型方向上的成型加工特征总量 $V_{i\max}$ 将多于其他组。在最佳分型方向上，成型特征组的量将是最大的，尽管它有可能与最大成型特征数量不相符。然而，如果不止一个方向满足式（3-1），那将意味着存在有两个以上需要相同容量的成型特征组。但是，最佳分型开模方向要选定在这些成型加工特征数目最大的成型特征组里。

3. 执行过程

在注射模的计算机辅助设计中，注射件的模型能用 CAD 的线框、表面或三维模式的文件输入。三维立体模型可以直接应用于计算机辅助设计，而线框式和表面式造型则需要转换成三维造型才能应用。如果设计注射件时没考虑其模塑的可行性，那么由于热膨胀、脱模斜度、结构和模塑的可行性的要求，为实现顺利模塑制造，就需要重新考虑设计注射件。图 3-12 所示为确定最佳分型开模方向的流程图。既然最佳分型方向同成型特征组的成型特征量最多的方向，那么其他非最佳分型方向上的成型特征将最少。在最佳分型开模方向确定后，成型特征在其最佳分型方向上可由型芯和型腔模塑。其他的成型方向的成型特征，将由相应侧型芯和侧型腔等模塑。

4. 实例

图 3-13 所示的薄壁模塑成型件由各种表面组成。所有的成型加工特征将被识别和提取，最佳分型加工方向将通过上述的方法得到。依照图中显示的最佳分

型方向，成型特征2到成型特征9可由型芯/型腔及其嵌件模塑。因为它们的成型加工特征方向与最佳分型开模方向一致。由于成型特征2和成型特征9不在最佳分型方向上，则要用两个侧型芯成型。

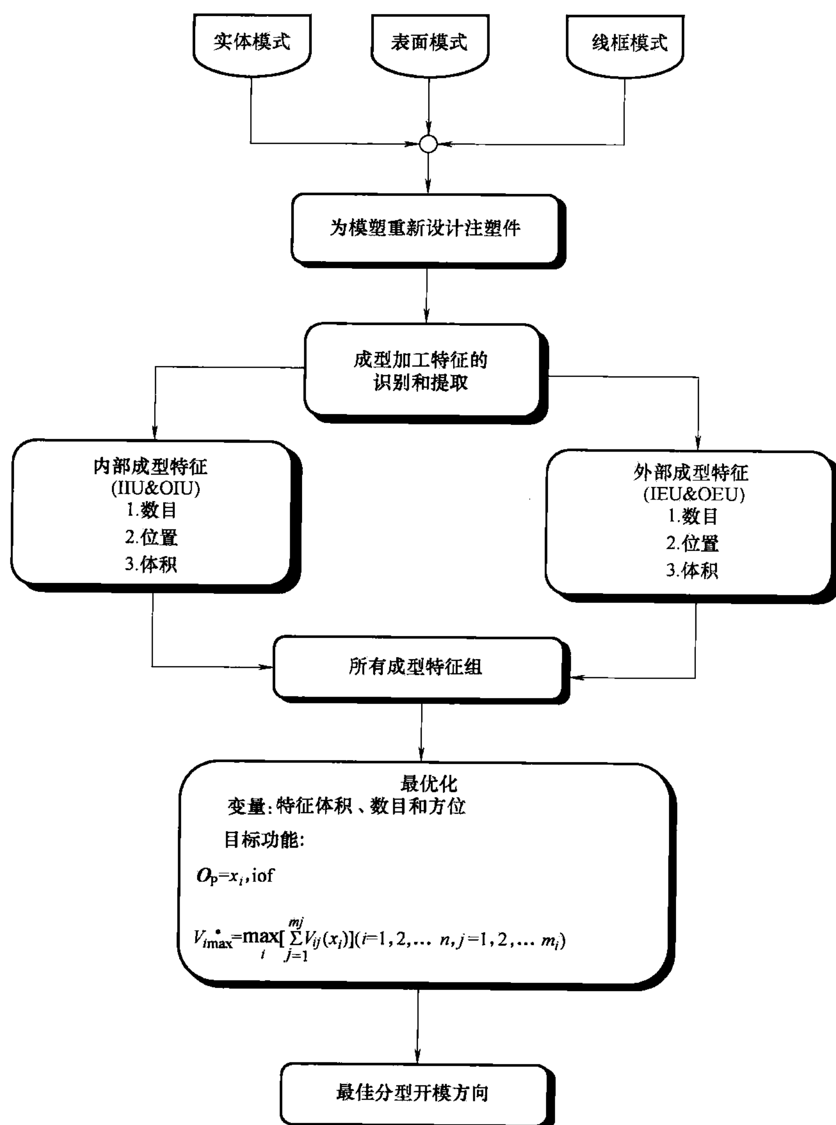


图3-12 最佳分型开模方向确定的流程图[15]

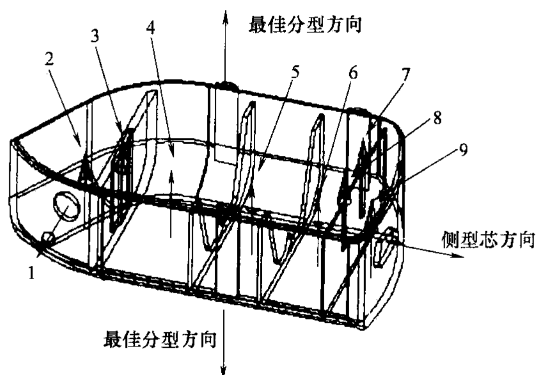


图 3-13 最佳分型开模方向：实例 1

图 3-14 所示为另一个塑料成型件。由于成型特征 1、2、3 和 4 的加工特征方向不在分型开模方向上，模塑这些特征时需用相应的模具结构。需要用侧型芯成型特征 1、2 和 4。需要用侧型腔成型特征 3。其他成型加工特征由型芯模塑。另一个实例如图 3-15 所示。它也是由各种表面组成的薄壁塑料成型件。最佳开模方向选取在“成型”特征容量最大的方向上。由于实际的成型加工特征 1、2、3 和 4 的方向均不在最佳分型方向上，它们只能被侧型芯模塑。而且因为成型方向不同，针对特征 1、2、3 和 4，需要四个不同的侧型芯。成型特征 5、6、7 和 8 的成型方向与最佳分型开模方向一致，所以由主型芯模塑。

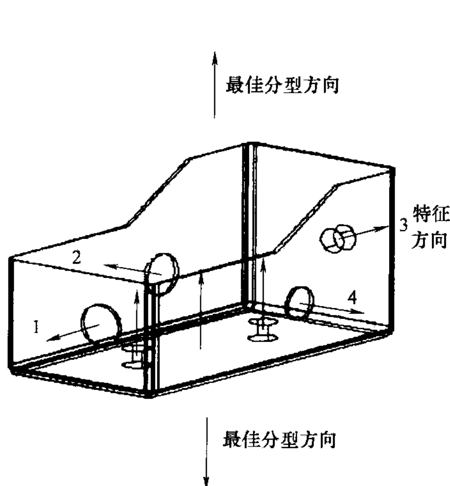


图 3-14 最佳分型开模方向：实例 2

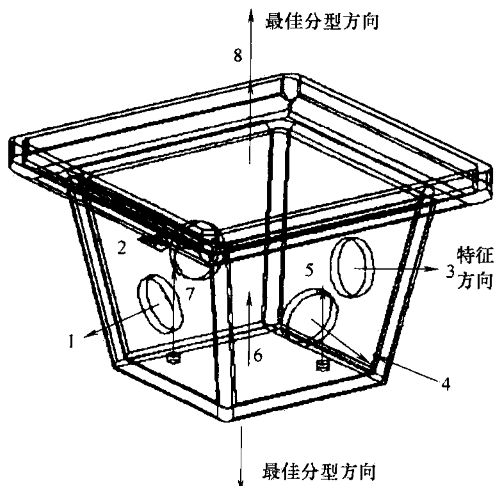


图 3-15 最佳分型开模方向：实例 3

3.4.2　分型线的产生

分型线是型芯/型腔与注射件表面的相互间分界线。分型表面是模具上型芯和型腔相配对的表面。在 CAIMDS 中，分型面和分型表面是在分型方向确定之后产生的。对于给定的分型开模方向，分型线和分型表面是根据注射件的几何特征确定的。

Tan 等人基于表面的法向和分型开模方向，将所有的分型表面分成显见表面和不可见表面[16,17]。如果分型表面的法向在分型方向上是正矢量，该表面为显见表面。如果表面的法向在分型方向上为负矢量，该表面是不可见表面。表面的法线垂直于分型开模方向的时候，如果至少有一个它的邻接表面的是显见表面，该表面就为显见面。表面的边界线根据是显见面还是不可见面，可分为显见边界线或不可见边界线。如果边界线由显见面和不可见面相贯而成，则它被认为是假设分型边界线。适当地把这些假设分型边界线连接起来，就可能形成所要求的关于最佳分型方向上的分型线。图 3-16 展示了有显见表面、不可见表面和假设分型边界线的注射件。

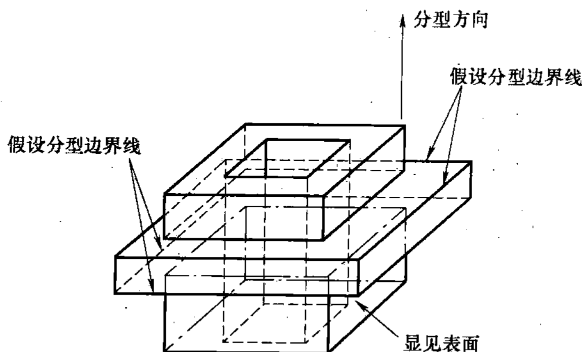


图 3-16　显见表面、不可见表面和假设分型边界线

Weinstein 和 Manoochehri[12] 提出了注射件和压铸件上分型线的确定方法。分型线的设置被描述成有次序的树形结构，其枝叶象征半模的成型表面。在某一叶片上，分型线沿着一组表面的外形边界线方向。基于树的分枝，表面可以划分为许多表面组，每个表面组的边界线代表分型线。最佳的分型线要基于多目标的职能判断，要顾及分型线的复杂程度、脱模深度、成型特征数量、侧型芯数量和模具的加工复杂程度等。最佳分型线应考使以上变量的目标职能函数最小化。

考虑到上述的五个参量，又基于多目标职能判断，分型线根据注射件凸起区域的外缘边线来确定。这是一项非常好的探索性研究，能查出各种参量是如何影响模具的制造及成本的。但这种确定分型线的方法有两个弊端：一方面，它只是根据表面的凸起状况来确定分型线，忽视了其他可能的情况；另一方面，多目标

的职能判断过于精细，使得分型线确定过程复杂化。注射件实际分型线的位置，应该是在使垂直开模平面上的投影面积最大的位置。

1. 自动生成分型线的方法

注射件的分型线是指模具的型芯和型腔所模塑表面的相贯线。一般来说，分型的类型有平面、阶梯和复杂分型。如果分型线在同一平面，则称为平面分型。如果分型线不在同一平面，连接到型芯和型腔的边界分型线的是二维的表面，称为阶梯分型。如果分型线不在同一平面，且连接分型线的二维表面不止是一个，则称为复杂分型。如果每个表面的法向矢量不在开模方向，而是有一定的斜度，那么，由型芯和型腔分别成型的表面组，在垂直于开模方向的平面上有相等的最大投影面积。根据这些设定，分型线在由型芯和型腔模塑成的两个表面组上有共同的边界，且在这两个表面组中有最大的边界环。同时，分型线在垂直于开模方向的平面上有最大的投影面积。如果两个表面组有共同的边界线，将很容易获得分型线。由于两个表面组不包括有侧型芯和侧型腔模塑成的表面组，因此有必要通过分析来确定这个表面组的分型线。

（1）模塑表面的分类

三维模型的注射制品能在 B-Rep 程序中描述。在该程序中，边界被假设分成有限数目的边界表面集合。其每个表面，依次可由自身的边界棱线和各棱线的顶点来描绘。因此，注射件的实体模型就成为封闭物体的表面组合。假定开模方向已知，并表述成两反相的矢量 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}$ 和 $-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}$。$\boldsymbol{L}_i$ 为表面 $\boldsymbol{F}_i$ 中心的法向矢量，表面 $\boldsymbol{F}_i$ 可以是平面、曲面或自由形成表面。它也可以是圆柱体、圆锥体或旋转表面的轴线矢量。注射件上所有表面集合概括在表 3-2，共分为 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}$ 为标准正方向的 $\boldsymbol{G}_1$、$\boldsymbol{G}_2$ 和 $\boldsymbol{G}_3$ 表面组。如果 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}$ 为型芯的开模方向，大多数的 $\boldsymbol{G}_1$ 表面集合能由型芯模塑成形；大部分 $\boldsymbol{G}_3$ 表面集合能由型腔模塑成型；一部分 $\boldsymbol{G}_2$ 表面集合可以由型芯加型腔模塑，或者由侧型芯加侧型腔模塑。

表面集合 $\boldsymbol{G}_1$、$\boldsymbol{G}_2$ 和 $\boldsymbol{G}_3$ 的要素分别被表示为 $\boldsymbol{G}_1^i$、$\boldsymbol{G}_2^i$ 和 $\boldsymbol{G}_3^i$，其边界环被表示为 $\boldsymbol{E}_1^i$、$\boldsymbol{E}_2^i$ 和 $\boldsymbol{E}_3^i$。表 3-2 列出了表面的重新分类。在表中，m_1、m_2 和 m_3 分别为 $\boldsymbol{G}_1$、$\boldsymbol{G}_2$ 和 $\boldsymbol{G}_3$ 的表面编号。对于 $\boldsymbol{G}_1$ 表面集合，如果其没有被 $\boldsymbol{G}_3$ 表面集合环绕，也没有与其他 $\boldsymbol{G}_1$ 集合相关连，则它们被重新归类为 $\boldsymbol{G}_3$。$\boldsymbol{G}_3$ 表面集合再次归类方法与之类同。对于 $\boldsymbol{G}_2$ 表面集合，如果其完全由 $\boldsymbol{G}_1$ 环绕而不与 $\boldsymbol{G}_3$ 相连，则其被归类到 $\boldsymbol{G}_1$。同样，对于 $\boldsymbol{G}_2$ 表面集合，如果其完全由 $\boldsymbol{G}_3$ 环绕，则其被归类到 $\boldsymbol{G}_3$。如此重新分类之后，$\boldsymbol{G}_2$ 表面集合将出现成型特征，且其不再影响分型线的位置。如果 $\boldsymbol{G}_2$ 表面集合与 $\boldsymbol{G}_1$ 和 $\boldsymbol{G}_3$ 同时有连接，它们将归类到 $\boldsymbol{G}_2'$。$\boldsymbol{G}_2'$是 $\boldsymbol{G}_1$ 和 $\boldsymbol{G}_3$ 变换的表面集合。因为有表面斜度，它们很少出现。如果存在 $\boldsymbol{G}_2'$表面集合，它们通常在成型特征里，并不影响给定 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}$ 下的分型线位置，除非是一些没有斜度的小表面。

表3-2　表面分类

表面类型	分类判别	再次分类的判断
G_1	$L_i \cdot P_D > 0$	如果，$(E_1^i \cap E_1^j = 0) \wedge (E_1^i \cap E_3^k \neq 0)$ $(i=1,2\ldots m_1, j=1,2\ldots m_2$ 和 $k=1,2,\ldots m_3; i \neq j)$，$G_1^i$ 归类为 G_3
G_2	$L_i \cdot P_D = 0$	如果 $(E_2^i \cap E_1^j \neq 0) \wedge (E_2^i \cap E_3^k = 0)$，$(i=1,2\ldots m_2, j=1,2\ldots m_1$ 和 $k=1,2,\ldots m_3)$，G_2^i 归类为 G_1 如果 $(E_2^i \cap E_1^j = 0) \wedge (E_2^i \cap E_3^k \neq 0)$，$G_2^i$ 归类为 G_2' 如果 $(E_2^i \cap E_1^j \neq 0) \wedge (E_2^i \cap E_3^k \neq 0)$，$G_2^i$ 归类为 G_2'
G_3	$L_i \cdot P_D < 0$	如果 $(E_3^k \cap E_3^j = 0) \wedge (E_3^k \cap E_1^i \neq 0)$，$(k=1,2\ldots m_3, j=1,2\ldots m_2$ 和 $i=1,2,\ldots m_1; k \neq j)$，$G_3^k$ 归类为 G_1

在模塑时，圆柱表面、圆锥表面和旋转曲面经常合成实体，用以创建凸台或孔特征。这些表面集合的分类，不同于以上方法。如果这些表面边界被 G_1 表面集合环绕，则它们属于 G_1 表面组；如果这些表面边界被 G_3 表面集合环绕，则它们属于 G_3 表面组。在实体中，连接表面经常是圆柱表面的，且至少有三条边界棱线。如果这些棱线中的两个是 G_1 或 G_3 表面的共同边界，它们就属于 G_1 或 G_3 表面集合组。球面表面集合也遵循以上法则。

图3-17表述了以上的方法，并说明了模塑件实例的所有表面的分类。图3-17a是个模塑件，图3-17b是 G_1 表面组。它们的中心法向矢量在分型方向上，

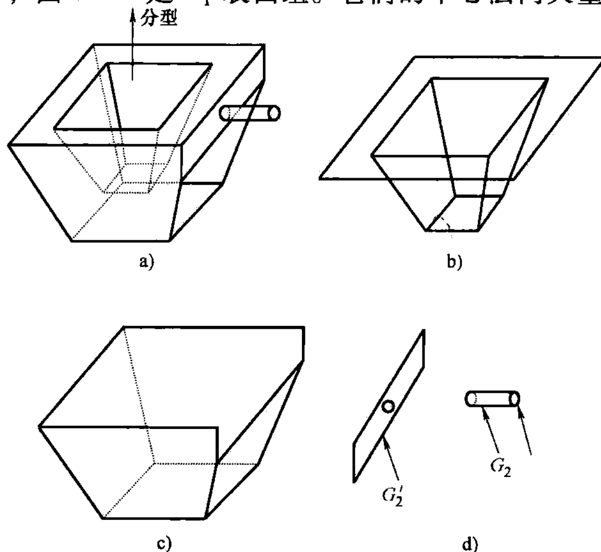


图3-17　模塑件的表面组

a）模塑件　b）G_1 表面　c）G_3 表面　d）G_2 和 G_2' 表面组

受到表面分类的判别。在图 3-17c 中的表面集合被归类到 G_3 表面组。图 3-17d 中表面是 G_2 和 G_2'表面集合组。基于表面重新划分标准，一些 G_2 表面集合被分到 G_2'表面集合中。圆柱表面和其相邻顶端面属于 G_2 表面集合。由于 G_1 和 G_3 表面集合相互之间可以转换，且符合 G_2 的再归类判断，所以平表面归属到 G_2'表面。从以上分类可以看出，G_1、G_3 和 G_2'表面组是影响分型线形成的表面组。

（2）分型线的定义

假设 P_D 是型芯的分型开模方向，G_1 表面集合是由型芯及其嵌件或相关定位装置模塑而成。G_3 表面集合则是由型腔及其嵌件，或相关定位装置模塑而成。大部分 G_2 表面集合具有成型特征，可由侧型芯和侧型腔等模塑。只在特殊情况下，一些小型 G_2'表面集合没有脱模斜度。它们可能会影响分型线的选取。大多数情况下，分型线是 G_1 和 G_3 表面集合的共同边界。分型线 P_L 定义式如下：

$$P_L = (G_1 \cap G_3) \vee [(G_1 + G_2') \cap G_3] \vee [G_1 \cap (G_3 + G_2')] \tag{3-2}$$

由于表面组 G_2'会影响分型线的确定，所以公式（3-2）包含 G_2'表面。一般而言，分型线就是 G_1 和 G_3 表面组的公共边界线。

（3）最大线框的产生

在 G_1 和 G_3 组中，表面集合通过公共棱线连接。在每组中，所有的表面由不同的次级表面集合组连接到一起。所有的次级表面集合组里，最大的次级组是通过型芯和型腔模塑形成的。其他具有成型特征的小型次级表面组，则用定位装置成型。如果分型方向已知或确定，小型的次级表面组不会影响分型线的位置。假定 G_i^k 和 G_j^k 是最大次级表面组 G_1 或 G_3 中相邻的两表面组，它们的表面线框分别是 EL_k^i 和 EL_k^j，以后的棱线连接被称为“线框扩大”过程。其结果由 EL_k^{i-j} 值表示，命名为扩大的线框。

$$EL_k^{i-j} = EL_k^i \cup EL_k^j \quad (\text{如果 } EL_k^i \cap EL_k^j \neq 0, k = 1,3) \tag{3-3}$$

图 3-18 说明了此过程。在应用上述方程式时，要先找出公共边界线。为了得到表面外的线框 EL_k^i 和 EL_k^j（k 代表组数，$k=1$，3），下面的判别式用于确定 E_k^{i-j} 是否是相邻表面 G_k^i 和 G_k 的公共边界线。

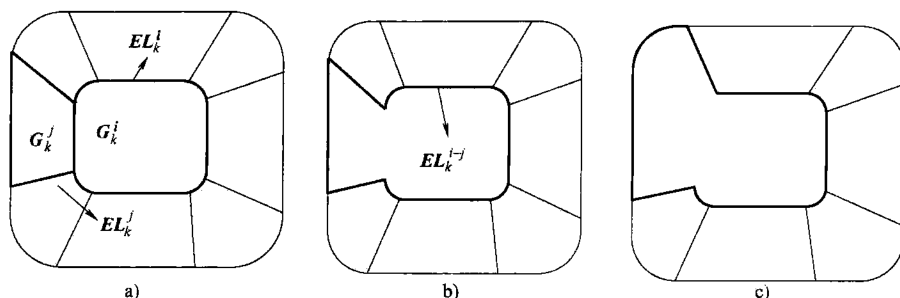


图 3-18　线框扩大过程

$$E_k^{i-j} = \{E_k^{i-j} \mid (E_k^{i-j} \subset EL_k^i) \wedge (E_k^{i-j} \subset EL_k^i)\} \quad (3\text{-}4)$$

如果满足上述判别式，E_k^{i-j} 就视为表面集合 G_k^i 和 G_k^j 的公共边界线。要探索找出公共边界线的步骤。在所有公共边界线被找到后，剩下的棱线将形成不同的线框，该线框的棱线与每个表面组相连。G_1 和 G_3 组中最大线框分别由 EG_1 和 EG_3 表示，它们可能是分型线。其他小型线框 G_1 和 G_3 组，通常会出现成型特征。

（4）分型线的判断

在工业实际中，分型线要与线框相对应。在此线框内在垂直开模方向的平面上有最大投影面积。依照当前的方法，两表面组的最大线框，首先应该有垂直于 P_D 方向的最大投影面积。第二，两个最大线框要精确相等。假定在表面组 G_1 和 G_3 上的两个最大线框 EG_1 和 EG_3 是分型线，应该满足下面的等式。

$$EG_1 = EG_3 \quad (3\text{-}5)$$

约束条件

$$Min\{\,|Project(Q,P_D) - Project(EG_1,P_D)|\,\}$$

$$Min\{\,|Project(Q,P_D) - Project(EG_3,P_D)|\,\}$$

其中，Q 是三维注射件。式（3-5）可以看作分型线的判别条件。等式表示，如果线框 EG_1 和 EG_3 是分型线，则它们应该精确相等。$Project(Q, P_D)$ 和 $Project(EG_1, P_D)$ 分别表示三维注射件的投影面积和 EG_1 在垂直于开模方向 P_D 的平面上投影。第二式的含义是 Q 和 EG_1 上的投影面积的差值，应该最小。相类似，第三式有同样的含义。

2. 执行

图3-19是分型线产生的流程图。基于这种方法，分型线可以由给定的三维注射件和最佳分型开模方向来确定。注射件分型线产生的流程概括如下。

1）将注射件的所有表面分成 G_1，G_2 和 G_3 表面组。

2）确定每个表面组的重要表面。

3）找出每个表面组的公共边界线和最大线框，再分别确定在 G_1 和 G_3 表面组中的最大线框 EG_1 和 EG_3。

4）计算注射件的 EG_1 和 EG_3，在垂直最佳开模方向的平面上的投影面积。

5）确定是否满足分型线的判别准则。如果每个表面组的最大线框都满足分型线准则的要求，则它们能成为分型线。否则，就需要重新设计分型线。在这种情况下，两表面组的最大线框，不出现在注射件的最大轮廓线上，也不包含注射件的实际分型线。所以，此方法不能自动确定分型线。此方法的局限性将在后面继续讨论。

应用这种方法，分型表面将由所有分型线的线条延伸来产生，再由型芯块和型腔块限制延伸表面形成。分型线的线条与两表面组的最大线框的棱线有关。分

型线给出的信息包括以下几项：

1）分型线线条的 ID 标识、分型线线条编号和在注射件棱线设置中的序号。

2）分型线线条的顶点及它们坐标。

3）分型线线条与其相邻的表面和棱线的拓扑关系。

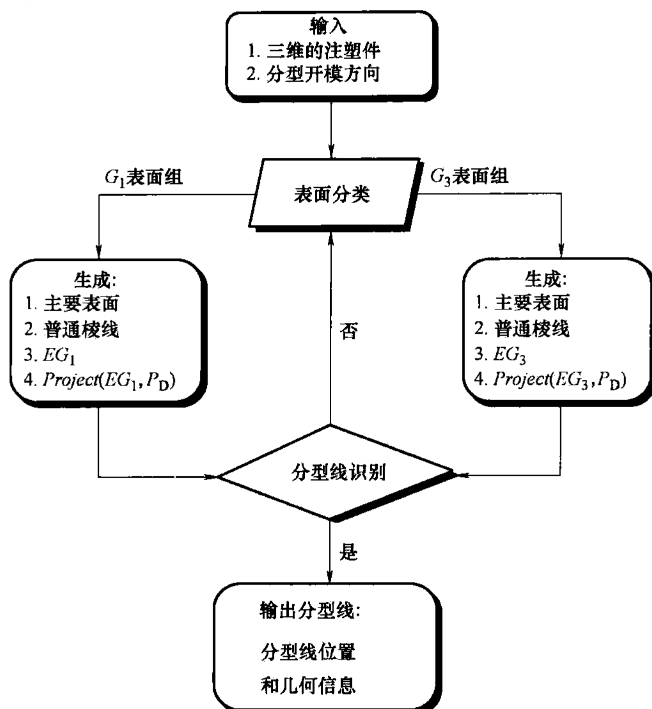


图 3-19 分型线生成的算法[15]

3. 实例

图 3-20 和图 3-21 都是薄壁注射件。注射件由各种不同类型的表面构成，它们的最佳分型开模方向分别如图 3-20 和图 3-21 所示。对于给定的开模方向，分型线是基于以上方法和运算法则得出的。两图中均描绘了分型线的产生。从两图可以看出，分型线是两个表面组相交的边界线，这两个组由型芯和型腔塑成，分别为 G_1 和 G_3。在图 3-20a 中，分型线是垂直于分型方向 P_D 和 $-P_D$ 的平面上最大投影面积的最大线框。垂直于 P_D 的平面上最大线框的投影面积与塑模件的投影面积相等。

图 3-21 描述了塑料注射件的更复杂分型情况。根据给定的分型开模方向，图中显示了分型线的产生。从中也能发现，分型线就是最大的轮廓线。从以上的两例可知，分型线的产生与工业实际的分型设计是一致的。采用以上方法用来自

动生成分型线的结果是令人满意的。

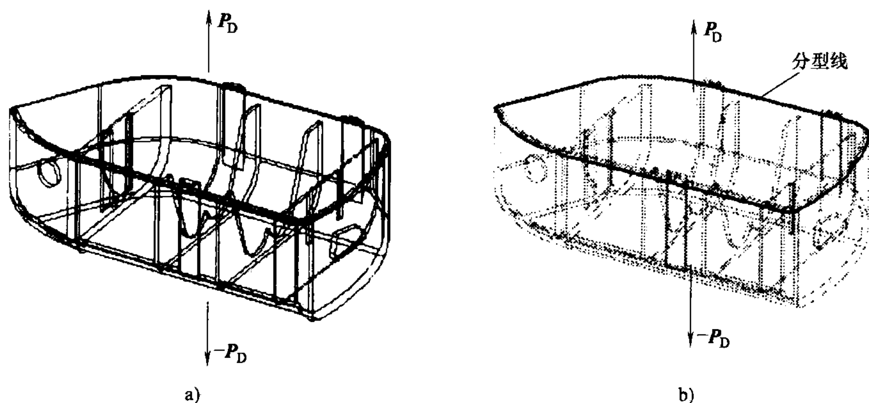


图3-20　分型线的产生：实例1

a）注塑件和分型开模方向　b）分型线位置

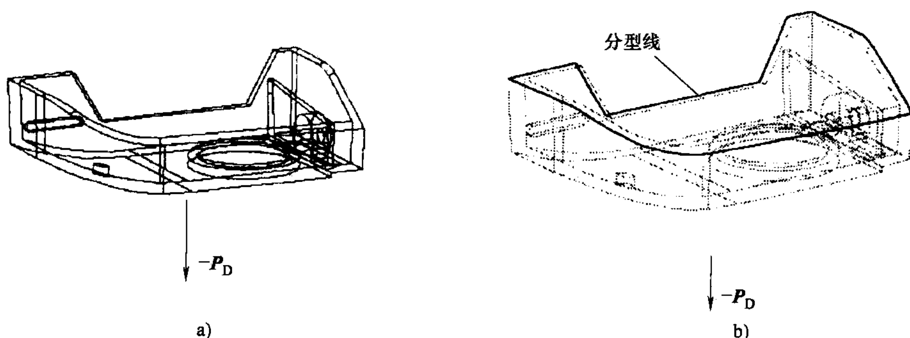


图3-21　分型线的产生：实例2

a）注塑件和分型开模方向　b）分型线位置

4. 局限性

分型线确定的依据是注射件线框的几何特征。如果在确定的分型位置没有线框，自动确定分型线是相当困难的。在此情况下，必须人工生成分型线。这还没有在以上方法的范围内讨论过。它固有的几何特征，使得其不可能自动产生分型线。以上的方法对下面两例，并不有效。

1）EG_1 或 EG_3 不在注射件的最大轮廓线（实际分型线的位置）上，如图3-22a所示。

2）最大线框没有包含分型线的全体几何特征，如图3-22b所示。在这种情况下，EG_1 和 EG_3 不包含实际分型线。可行的解决办法是在下一进程前，在实际分型线的位置上人工添加棱线，或者人工的创造出实际分型线。

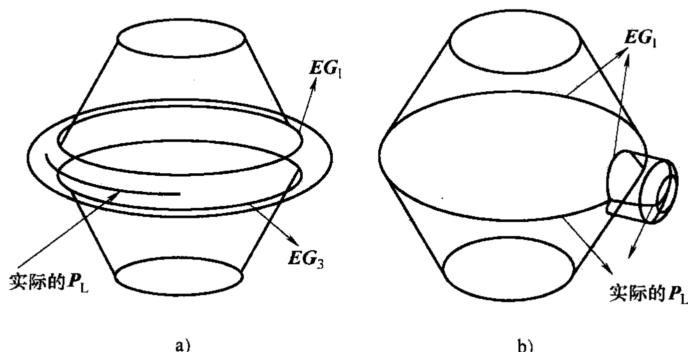


图 3-22　分型线自动生成方法的局限性

3.4.3　分型表面的确定

在前面部分已经提出了确定分型线的运算法则。本节将陈述给定分型开模方向和分型线，产生分型表面的方法。分型表面应作为型芯和型腔两半模的分开面。

分型表面是与型芯和型腔表面相匹配的面。分型表面在型芯型腔边界外侧，是由分型线朝外延伸生成的。有两种方法可以用来产生分型表面[18]。

1）扫描方式。分型表面由沿着型芯型腔的外边界的延伸方向扫描分型线产生。

2）辐射方法。分型表面也能用分型线辐射产生，其辐射距离大到足以让延伸表面。超出模板的外表面。

分型表面能用来作为分离表面，使两半模具分开。

1. 复杂注射件的扫描法

每个分型边缘上都要沿着相应的延伸方向产生自己的分型表面。扫描表面表示成 $\boldsymbol{P}_l^i(i=1,2...n_e)$。除扫描表面外，还有四个拐角表面 $\boldsymbol{P}_v^j(j=1,2,3,4)$，也是需要生成的。所有的扫描表面生成后，最后的分型表面 $\boldsymbol{P}_\mathrm{S}$ 定义为

$$\boldsymbol{P}_\mathrm{S}=\bigcup_{i}^{n_e}\boldsymbol{P}_l^i+\bigcup_{j}^{4}\boldsymbol{P}_v^j \tag{3-6}$$

对给定的分型方向和分型线来说，分型表面的产生过程概述如下：

1）计算扫描距离，确定切过注射件的分型表面，要使扫描距离足够长。

2）将分型线划分为四组。

3）确定每个边线组的延伸方向，如图 3-23a 所示。

4）沿着每个边线组的相应延伸方向扫描，如图 3-23b 所示。

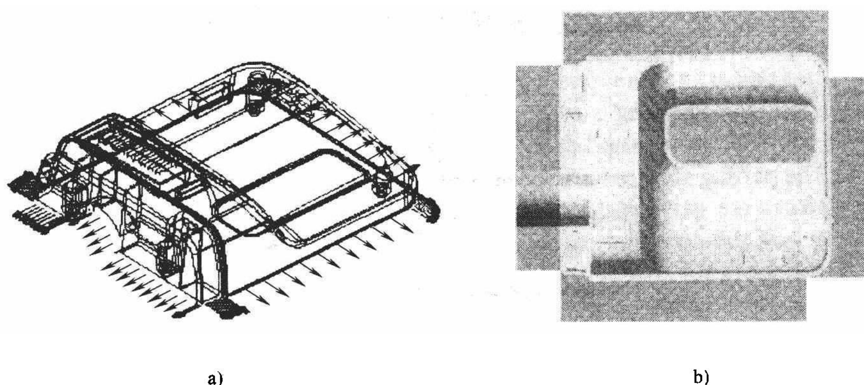


图3-23 延伸方向的确定

从分型线到型芯或型腔体的边界，延伸方向是沿着分型线扫描的路径。扫描方向垂直于分型方向，但平行于注射模的侧表面基准。

5）沿着两个延伸方向扫描四角的角顶。图3-24中高亮度处示明了 $\boldsymbol{P}_v^j$ 表面。

6）所有的扫描表面都要从注射件中除去。图3-25描述了分型每个面产生的程序。

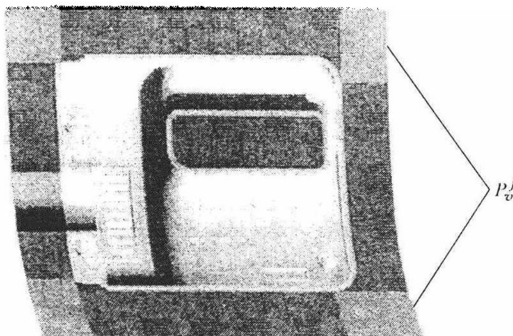


图3-24 $\boldsymbol{P}_v^j$表面

2. 辐射法

对于一些简单的零件，由给定辐射距离上的分型线辐射生成分型表面。指定辐射距离要足够大，以致可延伸到超出模板的外表面。图3-26描述的是辐射表面。辐射表面能作为两半模具分离的分型表面。具体步骤如下。

1）输入一个有分型线的实体模型。

2）计算辐射距离。

3）确定辐射方向。

4）沿着辐射方向将分型线辐射。

5）除去注射件上所有扫描的表面。

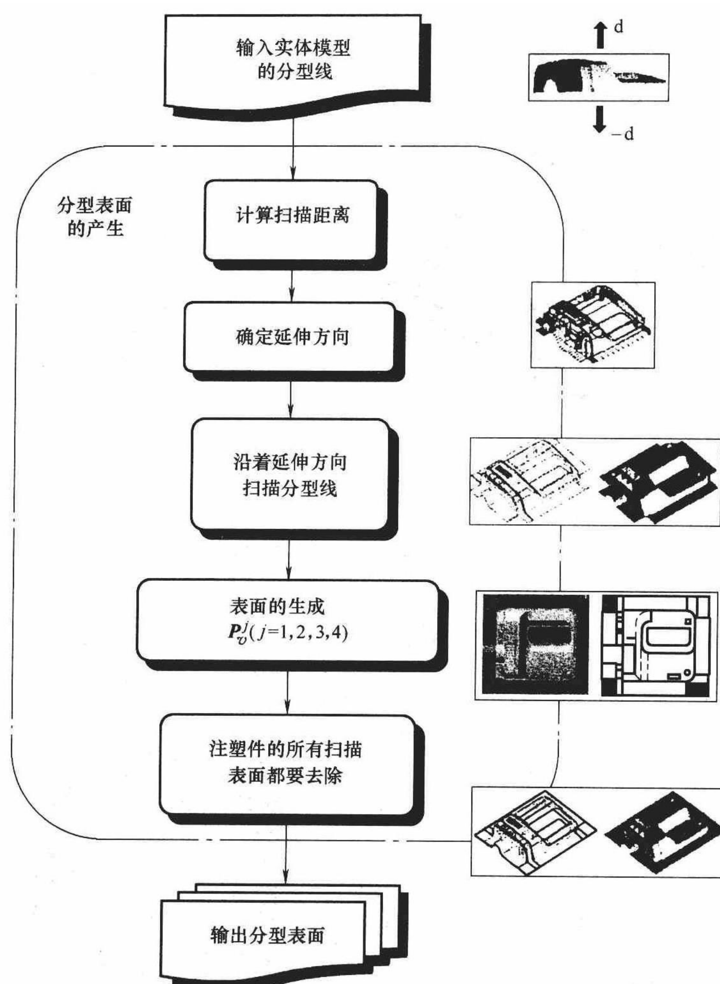


图 3-25 分型表面生成的扫描法

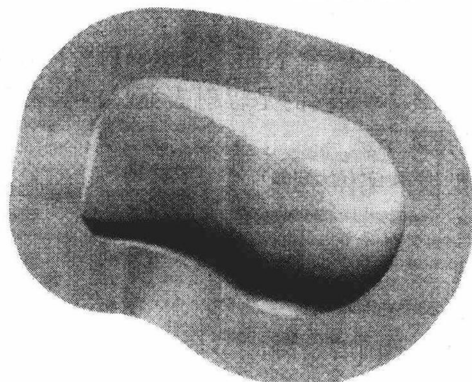


图 3-26 辐射分型面

3.4.4 型芯和型腔的自动生成

1. 运用布尔算法生成型芯和型腔

用分型开模方向、分型线和分型表面来描述型芯和型腔的产生方法。这种方法中运用了布尔微分，所以称作规整布尔微分操作法（Regularized Boolean Difference Operation Method）。具体过程如下。

（1）成型孔特征的识别

在所有成型特征中，要是表面含有成型特征，则被称为成型特征表面，记为 U_j^i，i 表示成型特征表面的序号，j 表示注射件的第 j 个成型特征。对于成型特征对象表面的中心，起始两条射线 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{U}}$ 有相反的两个特征方向。如果 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{U}}$ 射线和 U_j^i 表面没有交点，成型特征定义为孔成形特征。此特征可以表示如下

$$U_j^i \cap \boldsymbol{R}_{\mathrm{U}} = 0 \tag{3-7}$$

对于成型孔特征，必须对型芯和型腔的生成作补充。否则，通过布尔运算得出的型芯和型腔将不能分开。成型孔特征的补充是型芯和型腔生成的另一问题。图 3-27 说明了此简单的方法。由成型特征的几何实体的表面、边界线和顶点生成专门的成型体。成型体要包含精确的与成型孔特征的相同的容量。与注射件的专门成型体结合后，成型孔特征将得到补充。

图 3-27a 描述了简单的成型件，在其侧面上存在成型孔特征。图 3-27b 是基于特征几何实体的专门成型体。图 3-27c 是对成型孔特征进行修补后的注射件。实际上，成型体是侧型芯的成型头。基于特征几何实体的专门成型体的生成，从创建定位装置的意义上来说，是相当重要的。在对所有成型孔特征进行补充之后，注射件能被用来生成型芯和型腔。

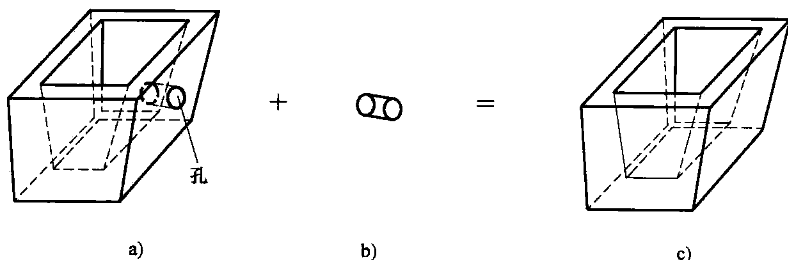


图 3-27 修补成型孔特征

a）注射件 b）特征体 c）补充后的注射件

（2）型芯和型腔的生成

型芯和型腔可由以下的步骤生成：

1）用合适的尺寸参数，生成封闭注射件的包容盒。

2）用规整布尔微分操作法修补注射件，除去它的包容盒。

3）由生成的分型表面，分开包容盒。

在步骤1）中，必须弄清 x、y、z 三个方向上的注射件的最大尺寸。根据注射件的工艺参量和模具的强度，决定模板包容盒的大小。在步骤2）中，规整布尔微分操作法被应用在包容盒及注射件的生成中，操作后包容盒形成内部空腔。在步骤3）中，之前生成的分型表面，将作为两半模的分离表面。一个是型芯块，一个是型腔块。整个过程如图3-28所示。

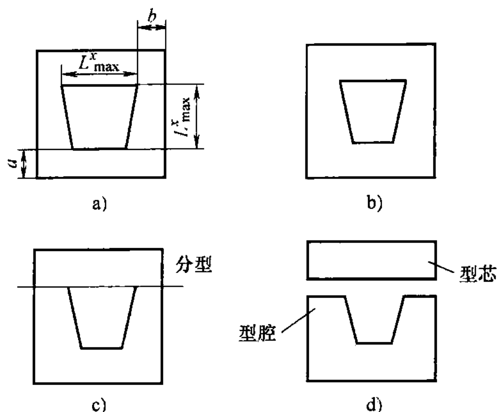


图3-28 型芯和型腔的产生过程

2. 实例

图3-29描述了注射件侧面上有四个成型孔特征。该分型线属于平面分型。首先产生定位装置头部，要提取成型几何实体的信息。注射件的所有的成型孔特征都要进行修补。下一步是生成包容盒。包容盒的参数根据经验确定，而且考虑模具材料的强度和注射件的参量。依照已知的分型线便可以产生分型表面。最后用模板替代包容盒，分型表面被分开。两半模，型芯块和型腔块即生成了。

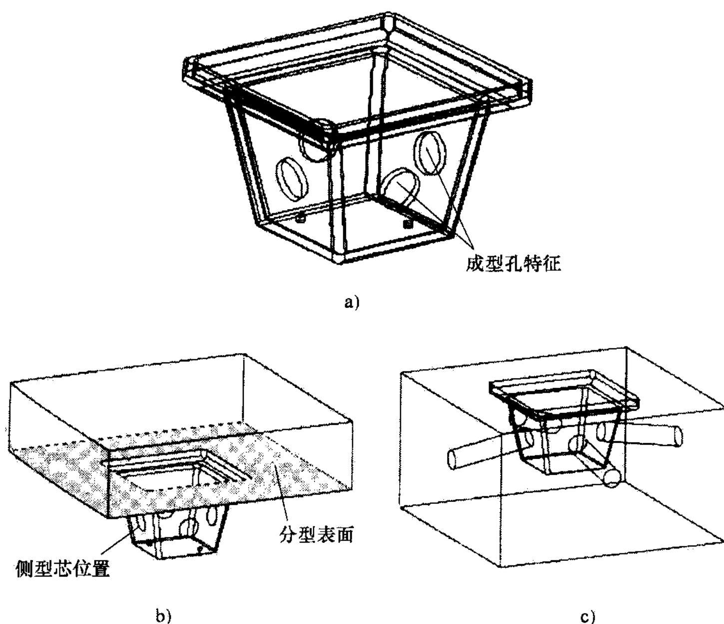


图3-29 分型表面、型芯和型腔的产生：实例1

a）注射件 b）型芯块 c）型腔块

在图3-29a中高亮度的面，是被提及方法生成的分型表面。在图3-29b中也显示了型芯块，图中的4个圆柱是4个侧型芯的位置。图3-29c是型腔块。图3-30a描述的是另一个注射件，它有复杂的分型表面。产生分型表面、型芯和型腔的过程与实例1是一样的。图中的分型表面是高亮度的面。在孔成型特征被补充后，包容盒被分成两半模块，形成了图3-30b和图3-30c所示的型芯块和型腔块。

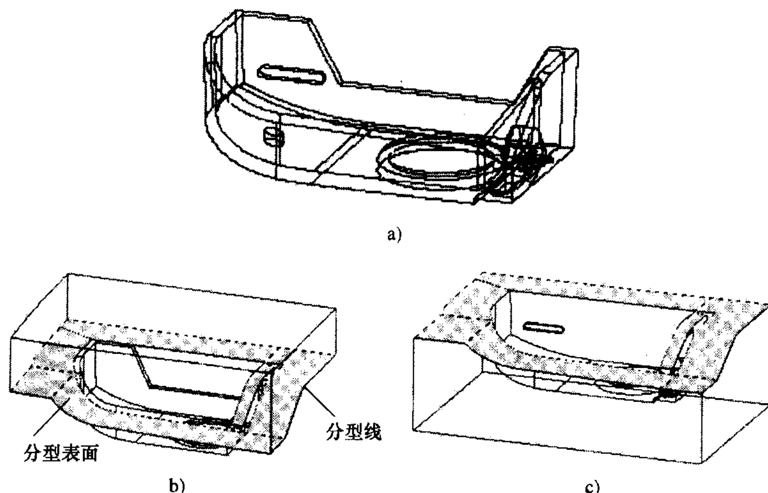


图3-30　分型表面、型芯和型腔的产生：实例2
a）注射件　b）型芯块　c）型腔块

3.5　型腔布局的自动设计

在注射模具设计的初始阶段，应该决定注射型腔的布局。计算机辅助注射模设计系统应具有使在单个模架上布置多个型腔变得容易的功能。本节将首先讨论确定型腔数量的各种准则，然后再介绍型腔布局的自动布排方法。

3.5.1　型腔数目和布局

1. 布局要求

现代注射机，料筒通常安置在定模板的中心轴上。这就确定了注入口的位置。型腔位置必须相对于中心注入口来安排，通过这种方法才能满足以下要求。

1）相同温度的熔料，应该在同一时间填充所有的型腔。

2）浇注系统的流程应尽量短，确保产生最少的凝料。

3）最终的布局不应该导致生产费用的额外增加。

第一个要求，确保了注射模浇注系统的平衡浇注。平衡浇注意味着从注入口到浇口的物料流动距离对于每个注射件都是相同的。平衡的浇注系统确保了每一

个型腔被熔料同时充填，所有的型腔都受到相同的注射压力，以致每个型腔都能生成同样的注射件。第二个要求，需要流道长度最短，以减少压力损失和浇道中废料的体积。较小的压力损失使塑料制品可以用小型的注射机生产。大型注射机会导致更高的间接成本和其他额外的费用。用小型注射机生产出的制品能获得使更高的效益。

安排注射模型腔布局之前，模具设计者必须首先确定型腔的数目，然后选择布局的形式和型腔安排的方向。型腔的数目主要取决于3个因素：制品的生产数量；生产成本；注射机的参数。布局的形式在很大程度上受注射模具浇注系统的限制。因此，当选择布局形式时，模型设计者必须牢记确保所设计的浇注系统的应该是平衡注射。模架上各型腔的方向主要由浇口的位置和注射件的形状确定。

2. 布局形式

有三个普通类型布局形式：环形布局、串联布局和对称布局。表3-3概述了不同布局形式的优、缺点。环形布局导致了生产时额外费用增加。因此，除非设计者另有说明，这种布局形式将不会被使用。最受欢迎的布局形式是对称布局，因为这种布局使所有的分流道具有相同的长度和尺寸。对称布局的型腔数目要满足2^n序列（如2、4、8、16、32、64、128……）。

表3-3 不同的布局形式

布局形式	优 点	缺 点
环形	● 所有型腔有相等的流动长度 ● 对需要旋出螺纹的注塑件、脱模时旋出螺纹较容易	制造生产有额外成本
串联	● 比环形布局能布置更多型腔 ● 易于制造加工	对各个型腔的流动长度不相等
对称	● 所有型腔有相等的流动长度，不用修正浇口 ● 易于制造加工	更大的流道体积，比环形和串联布局产生更多凝料

3. 型腔数目的确定

多型腔注射模的使用减少了每个成型件的直接劳动成本，提高了产量。但是，在较大的注射模中布置更多的型腔，必定会增加注射机的尺寸。因此，成本中包括了更多的折旧费用。确定型腔数目，必须充分考虑技术要求和经济指标。

（1）基于交货期限的型腔数目

型腔数目必须确保在所给定时间范围内的完成任务。基于塑料成型的时间，为满足交货限期，最小型腔数目应该用以下计算式确定[19]

$$n_d = \frac{K_r t_c L}{3600 t_m} \tag{3-8}$$

式中 K_r——舍弃因素，$K_r = 1.05$；

t_c——每件产品的成型周期，单位是 s；

L——注射制品的批量；

t_m——模塑成型制品的时间（工时）。

（2）基于成本的型腔数目

应用关于注射机、模架和型腔的生产成本的经验关系式，可预知最佳的经济型腔数目。基于衰退分析的试验数据，并假设模架成本通常独立于加工型腔的数目，Dewhurst 和 Kuppurajam[20]提出了最佳的经济型腔数目的计算公式

$$n_c = \left(\frac{L(k_1 + C_s)t}{1.1C_1}\right)^{0.6} \tag{3-9}$$

式中 L——注射制品的批量；

C_1——单个模具型腔的成本，单位是美元；

C_s——注射机监控操作成本，单位是美元/s；

t——注射周期，单位是 s。

及

$$k_1 = \frac{j_1}{P_k S_h (5 \times 10^6)} \tag{3-10}$$

式中 j_1——衰退分析常量，$j_1 = 15, 890$；

P_k——衰退折旧时间，单位是年；

S_h——生产轮班的数目；

(5×10^6) 代表了假定设备效率为 70% 的情况下，在一年中可回收的次品数目。

（3）基于注射机参数的型腔数目

考虑到注射机的局限性，型腔数目主要取决于注射成型机的以下参数：

1）锁模力，用来克服型腔内部压力产生的最大反作用力。

2）注射量，螺杆或柱塞式注射机一次注入型腔内的熔料量。

3）塑化效率，单位时间注射机提供的塑化物料的量。

基于锁模力，最大型腔数目可用下式算出[21]

$$n_{t1} = \frac{F_c}{K_s A_R P_i} \tag{3-11}$$

式中 K_s——前垫板的安全系数，约为1.2～1.5；

F_c——最大锁模力，单位为是N；

A_R——注射件和其浇注系统的投影面积，单位是mm^2；

P_i——型腔压力，单位是MPa。

基于注射量的最小型腔数目n_{t2}和最大型腔数目n_{t3}可由式（3-12）算出

$$n_{t2} = 0.2 \times \frac{V_s}{V_p};\quad n_{t3} = 0.8 \times \frac{V_s}{V_p} \tag{3-12}$$

式中 V_s——注射件的注射量，单位是cm^3；

V_p——注射件和浇注系统的容量cm^3。

最小型腔数应保证注射塑化装置中熔料的停留时间不能过长，而最大型腔数要保证熔料的热量和剪切均匀化。

基于塑化效率，最大型腔数目n_{t4}是

$$n_{t4} = \frac{t_c R_p 1000}{V_p \rho_m 3600} \tag{3-13}$$

式中 R_p——塑化效率，单位是kg/h；

ρ_m——塑料的密度，单位是g/cm^3。

因此，基于注射机参数的最小型腔数目n_{tmin}和最大型腔数目n_{tmax}是

$$n_{tmin} = \begin{cases} n_{t2}\,(n_{t1}, n_{t4} > n_{t2}) \\ 0 \end{cases} \tag{3-14}$$

$$n_{tmax} = \min(n_{t1}, n_{t3}, n_{t4}) \tag{3-15}$$

（4）自动确定型腔数目

为了找到最合理的型腔数目，这里提及以下过程。图3-31描述了此过程的流程图。依照此流程，型腔数目被最终确定，并使注射模和注射机在技术和经济上达到最佳的结合。首先，要依照交货期限和生产成本算出n_d和n_c。随后是注射机的选择，被选注射机的n_{tmin}和n_{tmax}可以根据式（3-14）和（3-15）算出。如果n_{tmin}比n_d小，n_{tmax}比n_d大，则被选注射机要与生产要求相适应。所以，型腔数目的确定，一方面要满足交货期限和生产成本，另一方面，所选注射机也要满足技术上的要求。最后，基于存在各种型腔数目，设计者可以或者制定首选的数目，比如均匀排列的数目等，或者重选注射机。

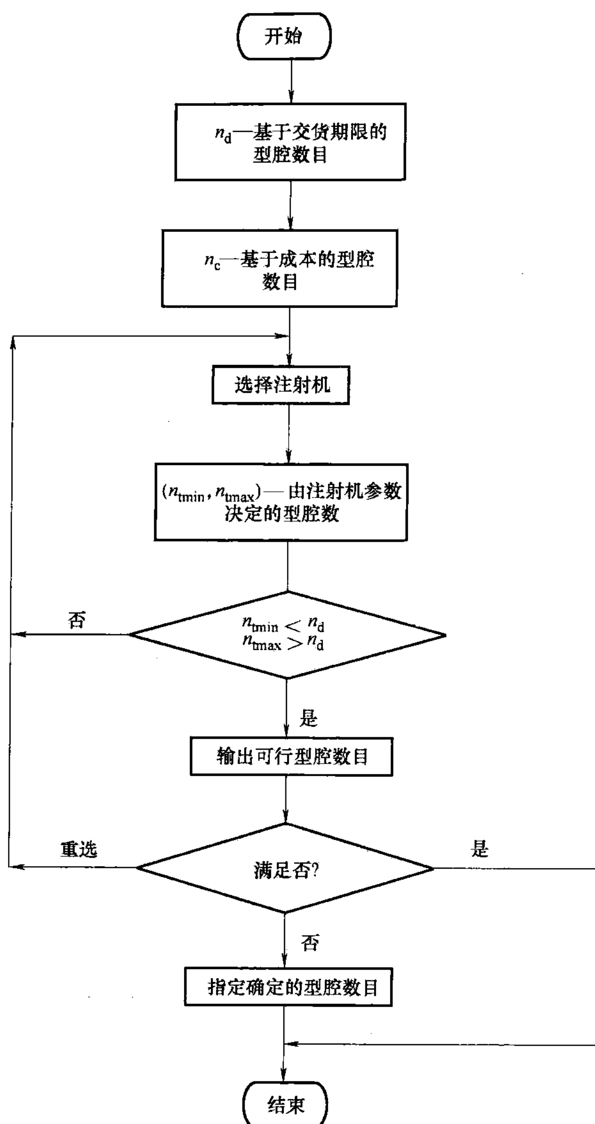


图3-31　决定型腔数目的流程框图

3.5.2　多型腔的自动布局

1. 塑料制品的特征组元

安排型腔布局必须考虑三个重要因素：制品形状、型腔数目和浇口位置。为

了解决问题，注射件的特征组元被提出来。这是针对几何特征和浇口特征的。图 3-32 所示为特征组元和它的表面属性。特征组元的顶面有三个属性：浇口类型、浇口位置和常规方向。特征组元的每一侧面有四个属性：浇口类型、浇口位置、常规方向和特征信息。特征信息的属性记录所有成型特征的表层辅助信息。如果使用点浇口，则在所有侧面的浇口特征都要设置为空，否则侧面将记录浇口类型和位置。比如，当一个扇形浇口定位在制品的左边，侧面 1 的浇口信息被设定为：Gate _ type = Fan _ gate & Gate _ pos = Matrix（9），其中 Matrix（9）代表了浇口的位置和方向。构造特征组元的步骤如下：

1）发现注射件的边界盒体。

2）识别制品的成型特征。

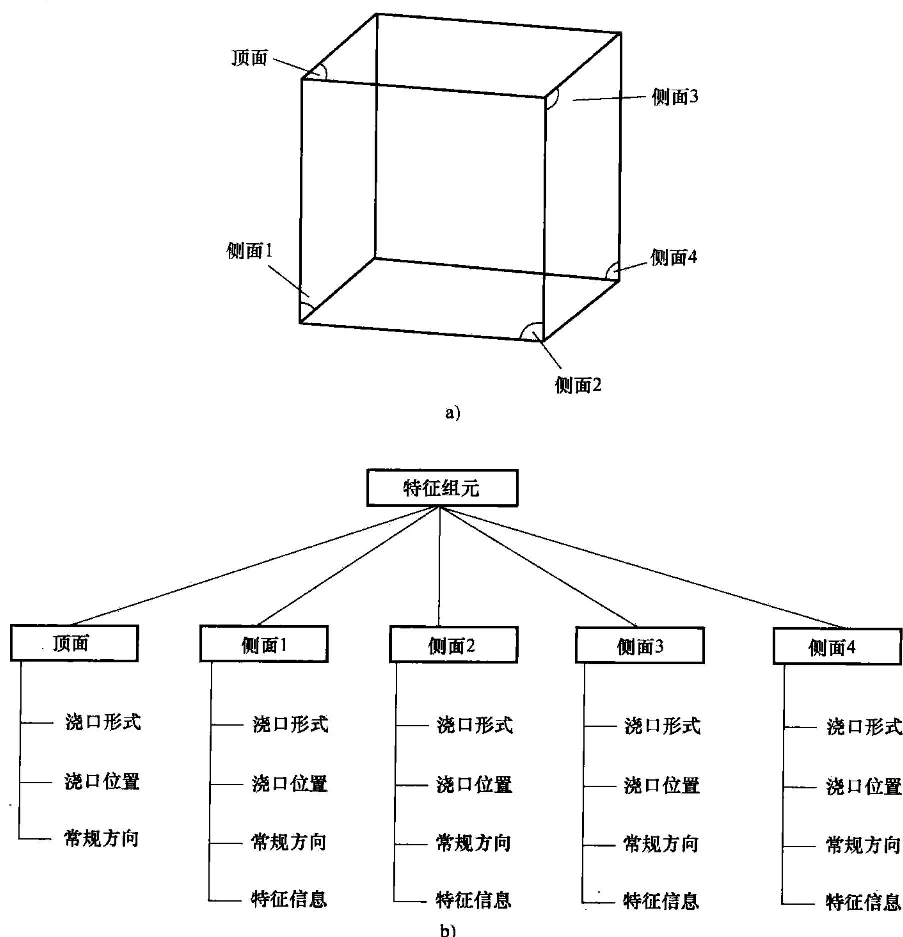


图 3-32　特征组元和表面属性

3）检验成型特征是否可以完全从边界盒体的四侧面的任何常规方向移开。

4）保存特征组元的所有五个面的浇口和特征信息。

为了安排模架里各个型腔的方向，成型特征必须给予考虑。关于成型特征详尽讨论将在3.6节引出。

2. 型腔布局的设计准则

安排每个型腔的方位是型腔布局所要关注的重要问题。型腔方位的设计可概括为以下准则：

准则1：如果浇口位于图3-33中的边缘a，浇口形状是“侧浇口”或“潜伏式浇口”，边缘所在侧面必须是个注入表面。

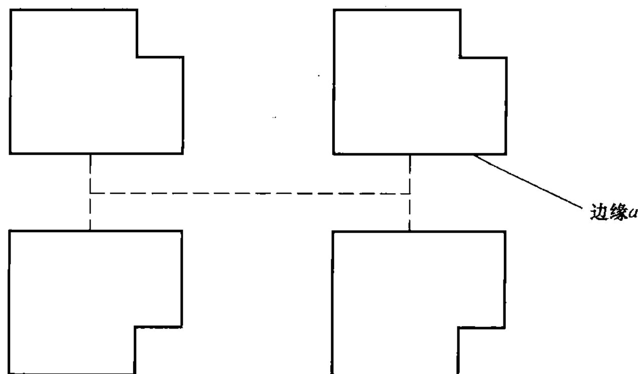


图3-33 四型腔布局

准则2：如果沿着侧面1存在外部特征，则侧面1不会是注入表面。

准则3：如果有超过两个方位的可能性，则要选择较小或最小的模架模板方位。

注入表面是一个连接浇口和浇注系统的面。型腔布局有三个问题：确定型腔的数目、选择布局模式和安排个别型腔的方位。自动布局过程将依次解决了这三个问题。图3-34所示为自动布局的流程图。首先，程序决定了基于不同标准的型腔数目问题，建立了注射件的特征组元。接着，根据型腔的数目选择布局模式。型腔数为单数的，将选择环形布局。对于偶数中2的幂函数的，诸如2、4、8等，选择对称布局。而其他偶数的，可使用串联布局。接下来将检测所有侧面满足方向准则的情况。如果使用针点式浇口，只有准则2可作为设定方向规则。对侧浇口、潜伏式浇口和扇形浇口，准则1和准则2都将是设定方向规则。最终，程序可找到最小尺寸的布局。

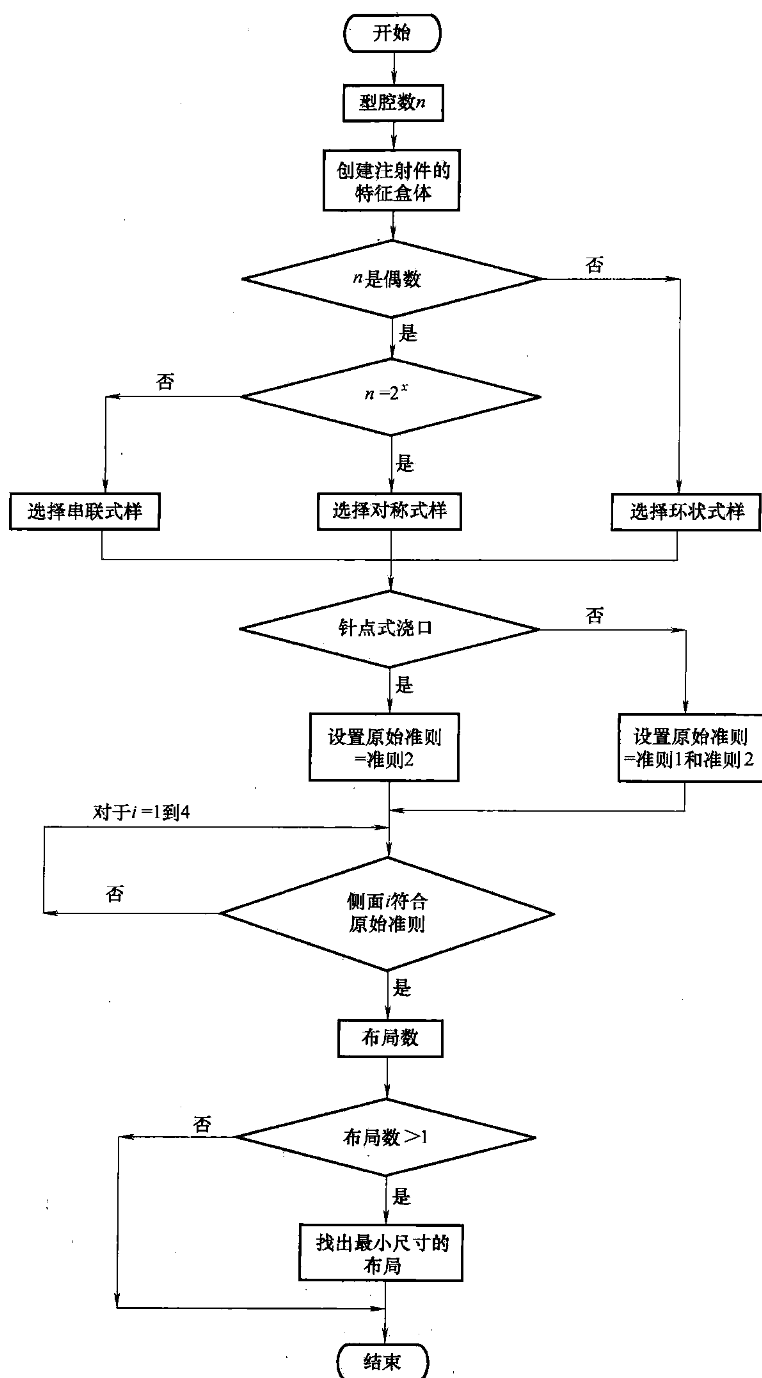


图 3-34 型腔自动布局的流程图

3.6 成型特征的识别和推理

因为成型特征取决于分型方向、分型线和分型表面、定位装置的数目和它们的工作机构、型芯和型腔及它们的嵌件，所以注射模里呈现的成型特征将影响模塑成本和模具的整体结构。注射件侧向的凹陷和凸起区域，不允许从顶出方向脱模，因而形成所谓的成型特征。成型特征的存在将直接影响模具的设计和制造，以致区域特征的分析，成为模具设计和制造领域的一个重要问题。自动识别这些成型特征，不仅可辅助注射模成本分析，也为设计提供了多个型腔布局的有用信息。本节中，将介绍一种混合方法[4]，其结合了图解强度法和提示法来识别塑料制品的成型加工特征。

3.6.1 成型特征的分类和定义

塑料制品的凸起和凹陷区域，可被视为是从注射模移到注射件上的，作为成型特征。成型特征能进一步分成凹陷成型特征和凸起成型特征。凹陷成型特征既是型腔表面组成的区域，又是凸状棱边环包的界面。对成型特征需要侧型芯及其一组附属零件通过完成侧向运动来成型。在注射件上可见到的每个成型特征，在注射模上都存在相应的区域，也被称为是注射模上的成型特征。图3-35说明了注射件和注射模上的成型特征。与注射件上凹陷成型特征相对应，在注射模上存在相应的凸起成型特征。

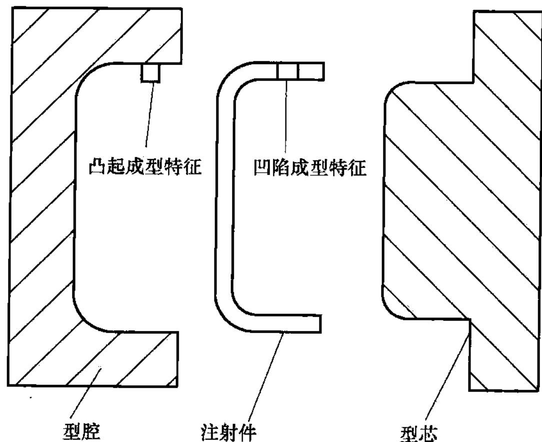


图3-35　成型特征

Fu[22,23]和Nee等人[13]将成型特征分成两类，称为表面特征和内部特征。表面特征进一步分为外侧表面特征和里侧表面特征。内部特征被分为外侧内部特征和里侧内部特征。他们提出了对成型特征的一系列认识判断方法。所有可能的特征被提取后，应考虑可能的特征数目及其相应的特征容量，则最佳脱模方向随即被确定。

Rosen等人[25]将成型特征归类为表面成型特征，并理解成注射模闭合方向的侧面。将内部成型特征仅理解成通过模具的型芯。对给出开模方向，首先要忽略

所有表面，采用表面法向矢量与开模方向的正数或零的点积来表达，并将所有其他表面投影到垂直开模方向的平面上。如果投影表面重叠，这些表面将成为一个成型特征。此方法能用来设计侧型芯和侧型腔。

3.6.2 成型特征的识别

成型特征的自动识别和提取，在 CAIMDS 系统里是相当困难的。在这方面有几个已发表的研究报告。Chen 等人[7,8]及 Mochizuki 和 Yuhara[8]提出了布尔规整差分法 BRDM（Boolean Regularized Difference Method），在模塑成型中识别和提取潜在的成型特征，区分塑料制品与它的凸起结构体。Mochizuki 在研究工作中，给出 Q 模式为多面体，用填料充填到凹形面中来显现凸起的多面体，并使它最小，恰好获得了原先的多面体。从给定的注射件多面体上减除了凸起的多面体，保留了注射件上潜在的成型特征。它被 Chen 称为封闭外壳。在实体模型的视图上表达上面的过程十分简单。对于给定的三维多面体 Q，有凸起构件 $CH(Q)$。寻找凸起结构件 $CH(Q)$ 和它原始的三维多面体 Q 之间差异。被识别差异 $CH(Q) - * Q$表达了在此基础上的潜在成型特征。最后步骤是通过布尔运算来识别差异的工作，因此称它为 BRDM。

由上所述，BRDM 系统用来提取潜在的成型特征由两个步骤组成。对 $CH(Q)$和 Q有不同的运行操作。凸起结构体 $CH(Q)$必须用实体模型描述，与原本多面体 Q 有相同的数据结构。从给出的多面体决定凸起结构体，需要合适的算法。第二步，在凸起结构体与多面体之间，运用布尔规整差分法。对几何造型，大多数普通的实体模型用布尔代数操作。在凸起结构体 $CH(Q)$和多面体 Q 之间，布尔规整差分法很容易运行。图 3-36 是使用 BRDM 的示例，在模式化中提取成型特征。图 3-36a 是 Q 的三维模式化。图 3-36b 是三维的凸起结构体 $CH(Q)$。对于凸起结构体 $CH(Q)$和三维模式的多面体 Q，图 3-36c 所示为用布尔规整差分法产生的成型特征。

除了以上方法，Ganter 和 Skoglund[26]发表了用布尔模式设计压铸模的成果，用来识别和提取三类特征：凹陷特征（内部凹空类）、单孔和多表面孔、边界交汇类。用限制凹陷特征方法识别特征。在金属压铸和塑料注射模中，型芯能模塑凸起特征和凹陷特征。因此，此方法不适合识别和提取模塑时的所有成型特征。

回顾特征的识别，在塑料制品包括深度方向的花纹标记在内的所有特征的识别是一项挑战性的工作。在注射件上识别和提取成型加工特征，是个新领域。以上所列一些方法各有许多限制，不能识别所有各种成型特征。

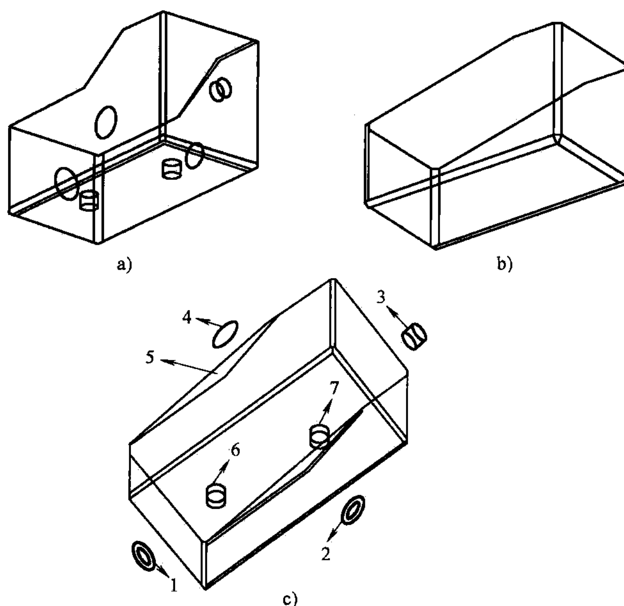


图 3-36 凸起结构体和潜在成型特征的产生

a）Q 的三维模式 b）三维凸起结构体 $CH(Q)$ c）$CH(Q) - *Q$(潜在特征)

3.6.3 提取成型特征的方向和范围

当型芯、型腔和它们的嵌件不能模塑成型成型特征时，需要设置侧向定位滑块机构。设计侧向滑块机构时，必须确立它的抽滑方向。在这方面，高斯的几何图形在坐标上表示方法 G-map（Gaussian-map）和另一种图形在坐标上表达方法 V-map 被提出来[7,27,28]。V-map 和成型特征范围被定义。V-map 用 G-map 描述，在 V-map 的成型特征的基础上，决定成型特征的伸展范围。

1. 表面的 G-map 和 V-map

高斯方法 G-map 描述平面是用它的法向。G-map 在单元球表面以给定的弧度位置，定义表面的法向[27]。诸如 NC 数控机床、几何模型和计算图像等领域，G-map 有许多潜在的应用。它也应用在金属板材成型的冷冲模设计中。G-map 生成时要变换单元球体，使它原始的法向矢量与给定表面 $\boldsymbol{F}_i$ 上任何位置的法向一致。对于法向矢量与球面的交点，转变为单元球坐标中心上的矢量。所有的交点在单元球体上生成时，它们便形成了 $\boldsymbol{F}_i$ 表面的 G-map。表面的 V-map，是从无数完全可见的表面上的点在单元球体上形成的。因为 V-map 上的每个点与它相应的 G-map 上的点，最多有 90°的差异。因此，V-map 系上表面能用横截的半球面构成。每个已有的顶点，作为在 G-map 上的点[29]。图 3-37a 说明给了定表面是如何在 G-map 和 V-map 上产生的。对于表面 A，该表面的方向是 $\boldsymbol{L}_i$，首先转

换图 3-37a 的 L_i 到图 3-37b 的单元球上，并确定交点为 A_0。在图 3-37b 上的交点 A_0 是表面 A 的 G-map。由于 G-map 里的每个点有个半球的 V-map，表面的 V-map 具有 G-map 各顶点的半球交点。表面 A 的 V-map，在图 3-37c 上显示是半球。图 3-37 所示为 B、C 和 D 表面的 G-map 和 V-map。仅表面在 V-map 上是空的。

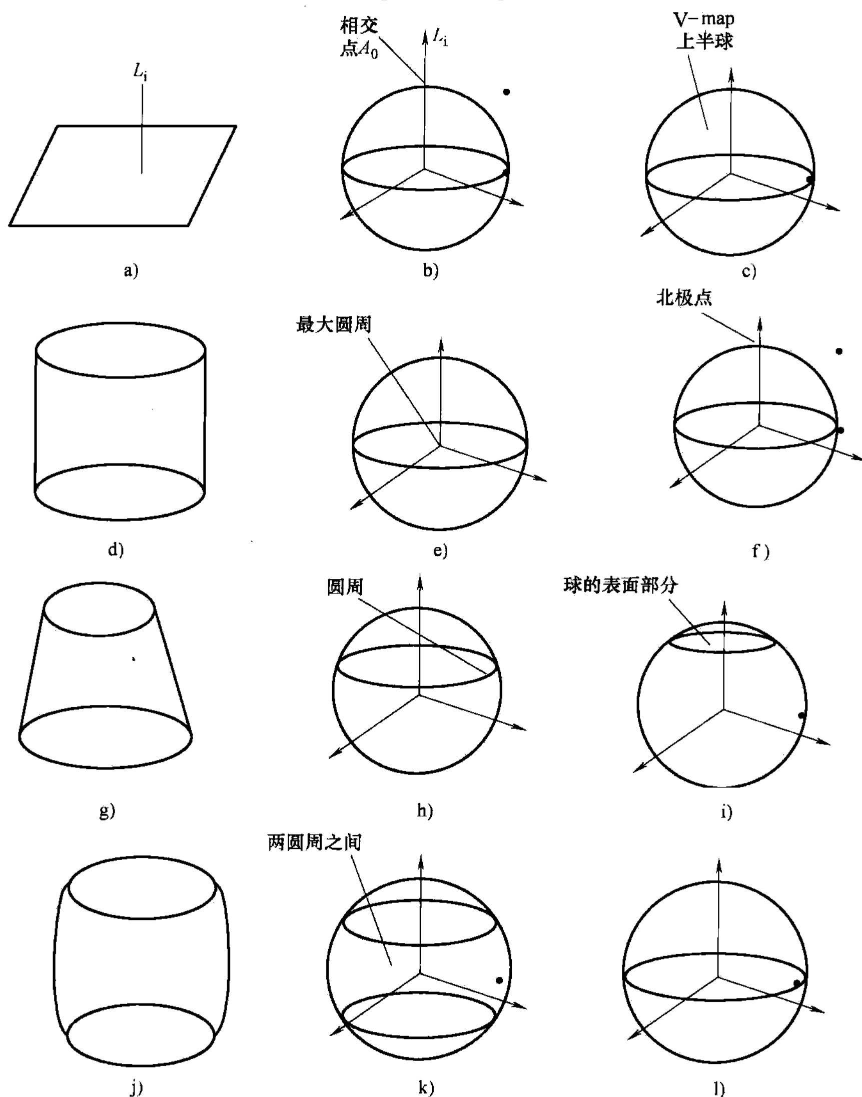


图 3-37　表面的 G-map 和 V-map

a）表面 A　b）G-map　c）V-map　d）表面 B　e）G-map　f）V-map
g）表面 C　h）G-map　i）V-map　j）表面 D　k）G-map　l）V-map（空）

在 Chen、Chou 和 Woo 倡导下[7]，G-map 和 V-map 已被用来确定最佳的分型方向。G-map 和 V-map 能被用来确定侧抽芯和侧成型型腔，或者决定其他侧向滑块机构的成型方向。为了确定成型方向，V-map 和成型特征的抽拔距，将在下一节中介绍。

2. 成型特征的 V-map 和抽拔范围

成型特征 V-map(U) 的 V-map，是所有成型表面组合的 V-map 的交点。所以，V-map(U) 被定义为

$$\boldsymbol{V-map(U)} = \bigcap_{i}^{n} \boldsymbol{V-map(F_i)} \tag{3-16}$$

式中 n——具有成型特征的表面数量。成型特征的说明在图 3-38a 中，所对应的 V-map(U) 显示在图 3-38b 中。在图上，$\boldsymbol{F}_{j1}$ 和 $\boldsymbol{F}_{j2}$ 为首先相邻的表面组，而 $\boldsymbol{H}_{j1}$ 和 $\boldsymbol{H}_{j2}$ 是另一个首先相邻的表面组。

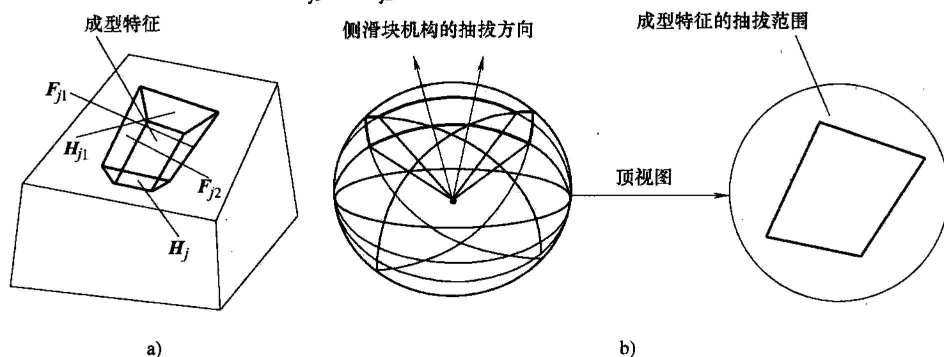


图 3-38 成型特征的 V-map
a) 成型特征 b) 相应 V-map 图形

成型特征的抽拔范围可参考注射件的侧向滑块机构的抽拔距离。在 V-map(U) 图上，V-map 图形的边界构成了成型特征的抽拔范围。实际上，不是所有对抽拔范围选取抽拔方向，是侧向滑块机构选取的抽拔方向。实际的抽拔方向，应该是侧向滑块机构能有效抽拔的方向。

3. 成型特征的方向

成型特征方向能作为侧向滑块机构的抽拔最有效的方向。该成型特征作为侧抽方向，应考虑到要避免注射件翘曲。在成型特征的 V-map 上，可发现 V-map 上任何点，都可以作为侧抽机构的抽拔方向。对任何给定的成型特征，在各个方向都存在一个最佳的抽拔方向。优化的抽拔方向才是成型方向。对于凹陷或凸起的成型特征，成型方向能被单独确定。外侧的成型特征，存在大于一个的最佳的抽拔方向。因此，有多于一个的成型特征。图 3-38 所示的情况，优化取得的方向 $\boldsymbol{L}$，是在相邻两表面组 $\boldsymbol{F}_{j1}$ 和 $\boldsymbol{F}_{j2}$ 以及 $\boldsymbol{H}_{j1}$ 和 $\boldsymbol{H}_{j2}$ 间的等分线上，如图 3-39 所示。

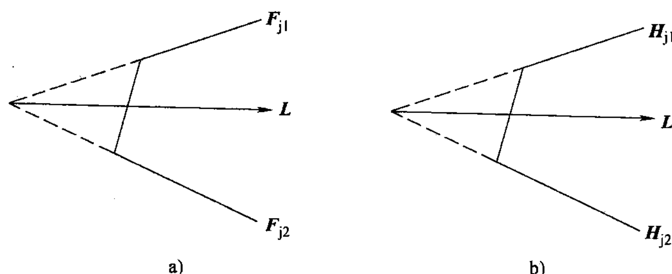


图 3-39 成型方向

3.6.4 实体模型的图形表述

实体的边界被作为图形结构表述。举例来说，表面与图形的交点和弧线图形的形成有关。图形视图的优点是能真正适合特征认知的图形算法技术的建立。另一方面，能添加有关表面、线条和顶点的低级信息。实体图形的表述能明确记录信息，帮助认知特征区域里表面相邻的类型。

1. 图形理论的术语

1）图形（Graph）。图形 $G=(N,A)$ 由一些节点 $N=\{n_1,n_2,\cdots\}$ 和弧线 $A=\{a_1,a_2,\cdots\}$ 组成。每条弧线 a_{ij} 将无序的成对节点 (n_i,n_j) 定义在一起。被弧线联结在一起的点 n_i、n_j，称 a_{ij} 的端点。

2）次级图形（Subgraph）。如果 G' 的所有节点和所有弧线均在 G 图形里，则图形 G' 称为图形 G 的次级图形；在次级图形 G' 里的每条弧线都会有图形 G 里相同的端点。

3）同形（Isomorphic）。如果图形 G 和 G' 的节点和他们间关联的弧线都各自对应，则两图形 G 和 G' 被称为同形。换言之，假定在 G 图形里弧线 a 有关联点 n_1 和 n_2，则在 G' 图形里，a' 必须与相应的 n_1 和 n_2 那样，与节点 n_1' 和 n_2' 相关联。

4）行程（Walk）。行程定义为节点和弧线有限次的变换结果，在每条弧线的起始和终止之间联结前一个和下一个节点。在一个行程上，弧线不会多于一条，也不能多于一条。

5）途径和环路（Path 和 circuit）。不多于一个节点的开放行程，称为途径。不多于一个节点的封闭行程，称为环路。

6）截取（Cut-sets）。在连通的图形 G 里截取弧线，即从 G 图形中分离不连接 G 图形的弧线。可以证明，这些不寻常的弧线子单元，已从 G 图形上移出。截取把图形切割成两半。换言之，假设联结图形 G 的所有节点被截分成两个相关的独立子单元，截取是移去最少的弧线，从 G 图形消除了两节点之间所有的途径。在本节中，A_c 代表截去的图形。

2. 塑料制品的邻接图形属性

Joshi 和 Chang[30] 提出了邻接图形属性 AAG（Attribute adjacency graph），支持对多面的特征和塑料制品特征识别。AAG 定义为 $G=(N,A,T)$，这里 N 是点集合，A 是弧线集合，T 是弧线 A 的属性。

1）对表面 F 集合里的每个表面 f，存在有点集合 N 的惟一点 n。

2）在 E 集合里的每条边线，在 A 弧线集合里存在惟一弧线 a。

3）在弧线 A 集合里每条弧线，都引导一个属性 t。如果表面的棱边由凹陷方向形成，则 $t=0$；如果表面的棱边由凸起角度形成，则 $t=1$。

图 3-40a 所示的实物体，它的 AAG 说明在图 3-40b 中。当每条弧线表述成注射件的棱线时，每个节点表述了注射件的表面。标记 1 或 0 说明了棱线的凹凸属性。对于凸起的棱线，它的凹凸属性是 1。对于凹陷的棱线，它的凹凸属性为 0。Joshi 和 Chang 已经证明，AAG 能有效地识别多面体的注射件的成型加工特征。然而，AAG 不适合表述具有标记和花纹雕刻表面的实体。对于如图 3-41 所示的实体，棱线 e_1 和 e_2 与表面 2 和 4 相关。因而它们在实体的 AAG 上的对应弧线有同样的凹凸属性，在特征识别期间会含糊不清。有个方法可避免这个含糊的缺点。这就是对表述注射件的 AAG，添加更有用的属性。Ye[4] 提出了面线图形属性扩展 EAFEG（Extended attributed face-edge graph），添加几个表面和线条的属性来表述实体，扩展了 AAG。EAFEG 的每点与单个表面有两个属性相对应，即表面性能和几何类型。EAFEG 的每条弧与实体上单条弧线有五个属性相对应：棱线的凹凸性、分型线的信息、封闭环的状态、顶点 1 和顶点 2。

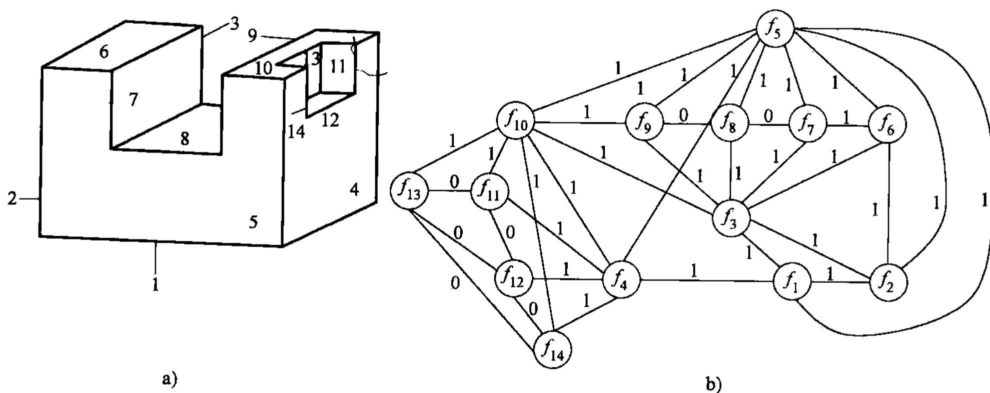


图 3-40 注射件和它的 AAG

3. 注射件的 EAFEG

实体扩充的表面-棱线图形的属性 EAFEG，被定义成四元方程式

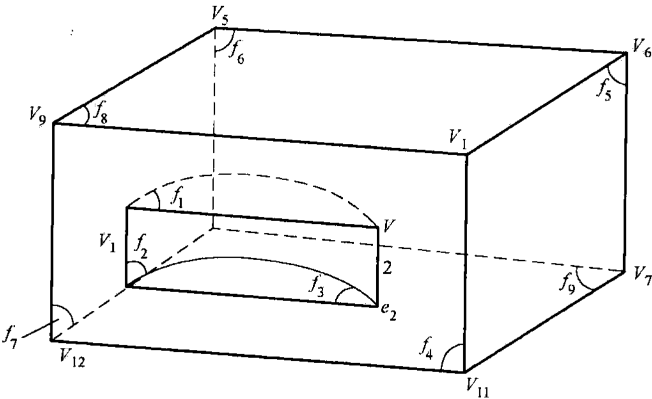


图 3-41　添加成型表面的注射件

$$G = (N, A, T_n(N), T_a(A))$$

式中　$N = \{n \mid n$ 是图形上的点$\}$；

$A = \{a \mid a$ 是图形上的弧线$\}$；

$$T_n(N) = \{t_n \mid t_n = (C(n), C_g(n))\};$$

$$T_a(A) = \{t_a \mid t_a = (Q_c(a), Q_p(a), Q_L(a), V_1, V_2)\}。$$

点和弧线的属性在表3-4中陈述。在 $T_a(A)$ 中引入顶点，在图3-41里能避免使棱线含糊不清。因为这两棱线的相关顶点有区别。如果 a_1 和 a_2 弧线各自与 e_1 和 e_2 棱线对应，可得到 $t_a(a_1) = (1,0,4,V_1,V_4)$ 和 $t_a(a_2) = (1,0,4,V_2,V_3)$，使 a_1 和 a_2 有所区别。

表 3-4　EAFEG 中的各种属性

属　性	值
$C(n)$:表面性能	$C(n) = \{-1,0,1,2\}$
$C_g(n)$:几何类型	$C_g(n) = 1$:是表平面 $C_g(n) = 2$:表面是二次曲面 $C_g(n) = 3$:表面是自由形成面
$Q_c(a)$:棱线的凹凸性	$Q_c(a) = -1$:凹陷棱线 $Q_c(a) = 1$:凸起棱线 $Q_c(a) = 0$:共有表面的棱线
$Q_p(a)$:分型线的信息	$Q_p(a) = 1$:棱线是分型线 $Q_p(a) = 0$:棱线不是分型线
$Q_L(a)$:环的类型	$Q_L(a) = n$:棱线 e 是在节点 n 环内 $Q_L(a) = 0$:棱线 e 是在环外
$V_1(a)$:顶点1	$V_1(a) = (X_1, Y_1, Z_1)$
$V_2(a)$:顶点2	$V_2(a) = (X_2, Y_2, Z_2)$

在弧线的属性里，棱线的凹凸性是识别成型特征有关规则所必需的。凹陷棱线定义为，共用表面法向矢量之间的夹角小于180°。凸起棱线定义为，共用表面法向矢量之间的夹角大于180°。然而，仅仅由表面法向矢量的夹角决定棱线凹凸，会导致不确定性。图3-42说明了凹陷棱线和凸起棱线两种情况的表面法向的夹角在90°和180°之间。为避免棱线凹凸性的含糊不清，Dong和Vijayan[32]提出了下面算法，来区别棱线的凸起和凹陷。他们的算法基于如下事实：

"两平面的公共棱线，如果是凸起棱线，在表面中央点连接的矢量与第二表面法向之间的夹角为0°和90°，标记为正。相类似，如果是凹陷棱线，在表面上连接的矢量与第二表面法向之间的夹角为90°和180°，标记为负。"

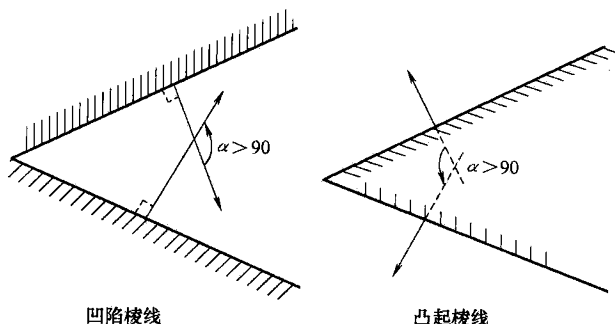


图3-42 凸起棱线和凹陷棱线的法向夹角

4. 成型特征的EAFEG

侧向凸起和/或凹陷的存在，会妨碍模具中塑料制品的脱模。因此，需将成型特征分成凸起成型特征和凹陷成型特征。凹陷成型区域由一些凹陷的表面组成，并由凸棱的环线组成边界。凸起成型区域由一些凸起的表面组成，并由凹棱的环线组成边界。进而言之，凹陷成型被分成有底凹陷（Blind depression undercut）和贯通凹陷（Through depression undercut）。如果凹陷区域仅连接型芯或者型腔，此凹陷区域称有底凹陷，图3-43a所示。如果凹陷区域连接型芯和型腔两者，此凹陷区域称贯通凹陷，图3-44a所示。对于成型特征的识别，需要精细的定义。在此方法中，每种成型特征用次级图形来定义。用一些必然的性能来区分各成型特征。

（1）隔离成型特征

定义3.1： 对图形G的次级图形G_1，G_1的一次切割为A_c。所有的节点分离对A_c发生，沿着G-G_1，称分离节点，N_s是一些分离节点。所有节点被A_c切割并归于G_1时，称为结构节点，N_c是一些结构节点。与此对应，在塑料制品中存在结构表面和分离表面。

现有的成型图形，成型特征被分离的次级图形能作下述的定义。

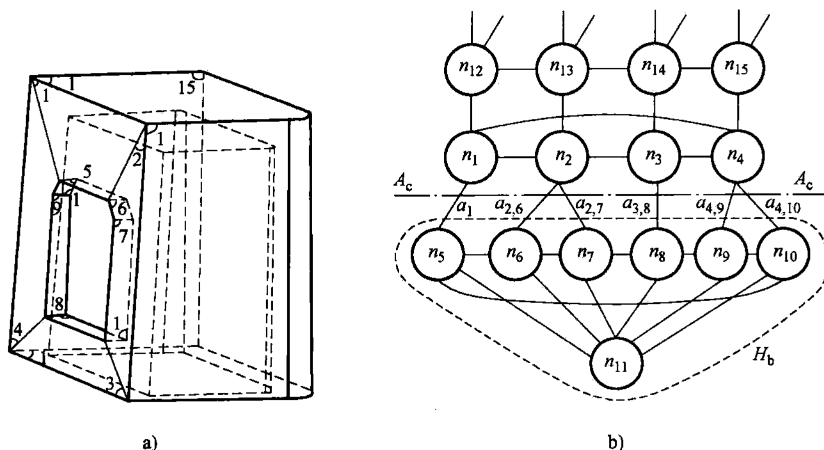


图 3-43　有底凹陷和它的次级图形

a）有底凹陷的注射件　b）有底凹陷的次级图形

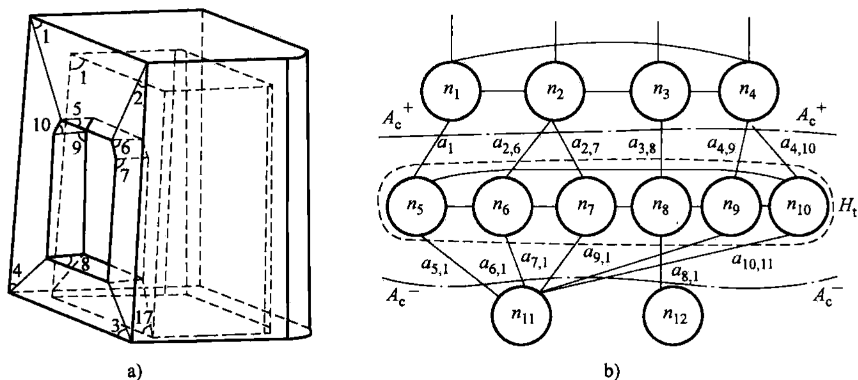


图 3-44　贯通凹陷和它的次级图形

a）贯通凹陷的注射件　b）贯通凹陷的次级图形

定义 3.2：塑料制品的给定球面 G 的 EAFEG，成型图形 H 是个次级图形 G，即 $H=(N_h, A_h, T_n(N_h), T_a(A_h))$，$H$ 被联结起来，而且

1）结构节点 N_c 中，至少存在一个正节点 n_i，即 $C(n_i)=1$。

2）结构节点 N_c 中，至少存在一个负节点 n_j，即 $C(n_j)=-1$。

3）成型图形 H 中，所有的弧线有凹凸性能。

4）H 的切割 A_c 有分离性能。

5）H 的所有分离节点有分离节点性能。

对有底凹陷、贯通凹陷和凸起、凹凸性能、切割性能和分离节点性能的总结，如表3-5所示。在图3-43里说明了有底凹陷的塑料制品。有底凹陷由表面f_5、f_6、f_7、f_8、f_9、f_{10}和f_{11}组成，从塑料制品的主体表面f_1、f_2、f_3和f_4上分离出来。因此，一些分离节点是$N_s=\{n_1,n_2,n_3,n_4\}$，一些切割$A_c=\{a_{1,5},a_{2,6},a_{2,7},a_{3,8},a_{4,9},a_{4,10}\}$，一些结构节点$N_c=\{n_5,n_6,n_7,n_8,n_9,n_{10}\}$。

表3-5　成型图形的性能

性能	有底凹陷	贯通凹陷	凸　起
切割性能	(1) $Q_c=(a_{ij})=1$ 或 0，$a_{ij}\in A_c$ (2) 顶点在$T_a(A_c)$形成的封闭环	(1) $Q_c=(a_{ij})=1$ 或 0，$a_{ij}\in A_c$ (2) $A_c=\{A_c^+,A_c^-\}$ (3) 顶点在$T_a(A_c^+)$形的封闭环 (4) 顶点在$T_a(A_c^-)$形的封闭环	(1) $Q_c=(a_{ij})=-1$ 或 0，$a_{ij}\in A_c$ (2) 顶点在$T_a(A_c)$形成的封闭环
凹凸性能	$Q_c=(a_{ij})=-1$ 或 0，$a_{ij}\in A_h$	$Q_c=(a_{ij})=-1$ 或 0，$a_{ij}\in A_h$	$Q_c=(a_{ij})=1$ 或 0，$a_{ij}\in A_h$
分离节点性能	$C(n_i)\times C(n_j)\neq-1$，$n_i,n_j\in N_s$	(1) $N_s=\{N_s^+,N_s^-\}$ $N_s^+=\{n\in N$ 和 n 与 A_c^+ 弧有关$\}$ $N_s^-=\{n\in N$ 和 n 与 A_c^- 弧有关$\}$ (2) $C(n_i)\times C(n_j)\neq-1$，$n_i,n_j\in N_s^+$，或 $n_i,n_j\in N_s^-$	$C(n_i)\times C(n_j)\neq-1$，$n_i,n_j\in N_s$

如图3-44所示的贯通凹陷，一些结构节点$N_c=\{n_5,n_6,n_7,n_8,n_9,n_{10}\}$；作一些切割$A_c=\{A_c^+,A_c^-\}$，这里$A_c^+=\{a_{1,5},a_{2,6},a_{2,7},a_{3,8},a_{4,9},a_{4,10}\}$；$A_c^-=\{a_{5,11},a_{6,11},a_{7,11},a_{9,11},a_{8,12},a_{10,11}\}$。一些分离节点$N_s=\{N_s^+,N_s^-\}$，这里$N_s^+=\{n_1,n_2,n_3,n_4\}$；$N_s^-=\{n_{11},n_{12}\}$。

对于凸起的成型特征的说明，如图3-45所示。对一些结构节点$N_c=\{n_5,n_6,n_7,n_8,n_9,n_{10}\}$；作一些切割$A_c=\{a_{1,5},a_{2,6},a_{2,7},a_{3,8},a_{4,9},a_{4,10}\}$和一些分离节点$N_s=\{n_1,n_2,n_3,n_4\}$。

以上关于成型特征的定义，有两个优点。首先，定义自由表面没有模棱两可。第二，定义灵活，足以总括特征关系。因为它们不强调弧线和点的所有约束。

a)

b)

图 3-45 凸起和它的次级图形

a）凸起的注射件 b）凸起的次级图形

（2）交互的特征

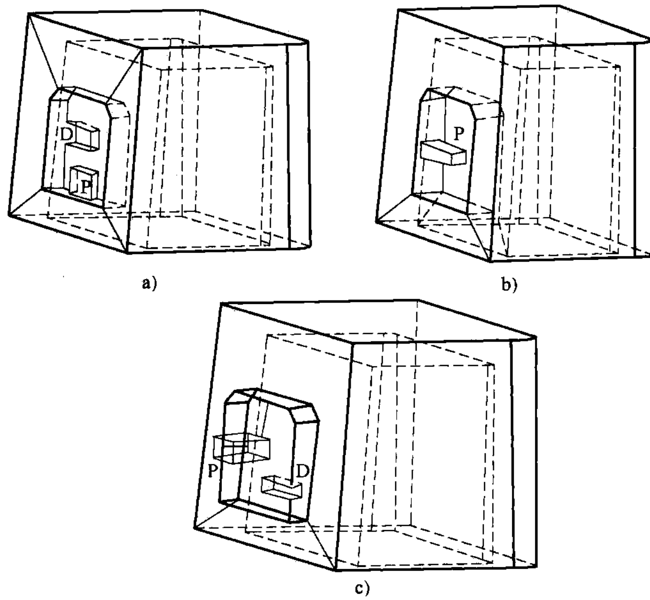
“特征的交互”是特征边界的交集，是一些标准或一般被变更的形状或其他特征。它们包含各特征的相互关系，称为交互成型特征。根据各种切割关系，交互成型特征能分成两种类型：Ⅰ类交互成型特征和Ⅱ类交互成型特征。

定义 3.3：Ⅰ类交互成型特征。给定成型特征 H_{I} 和特征 H_G，其 H_G 是个分离特征或者是一般凹陷/凸起特征。如果 H_{I} 能和 H_G 相互作用，H_{I} 就是Ⅰ类交互成型特征，成型特征的内表面之间除了凸起性能外，H_{I} 具有所有分离特征的性能。

因为 H_{I} 表述分离特征，Ⅰ类交互成型特征能进一步分类为Ⅰ类有底凹陷、Ⅰ类贯通凹陷和Ⅰ类凸起。图 3-46 说明了各种Ⅰ类交互成型特征，粗线显示交互成型特征的切割。从该图上可看到，一些切割的交互特征在特征相互作用后维持不变。P 处指具有成型特征的凸起交互位置。而 D 处指具有成型特征的凹陷交互位置。

定义 3.4：Ⅱ类交互成型特征。Ⅱ类交互成型特征 H_{II} 是有底凹陷 H_{I} 和特征 H_{G} 之间相互作用结果。此 H_{II} 从 H_{I} 上有不同的切割，因而任何两个结构表面之间的凹凸性能也有变更。H_{G} 或是分离成型特征，或是一般凹陷/凸起特征。

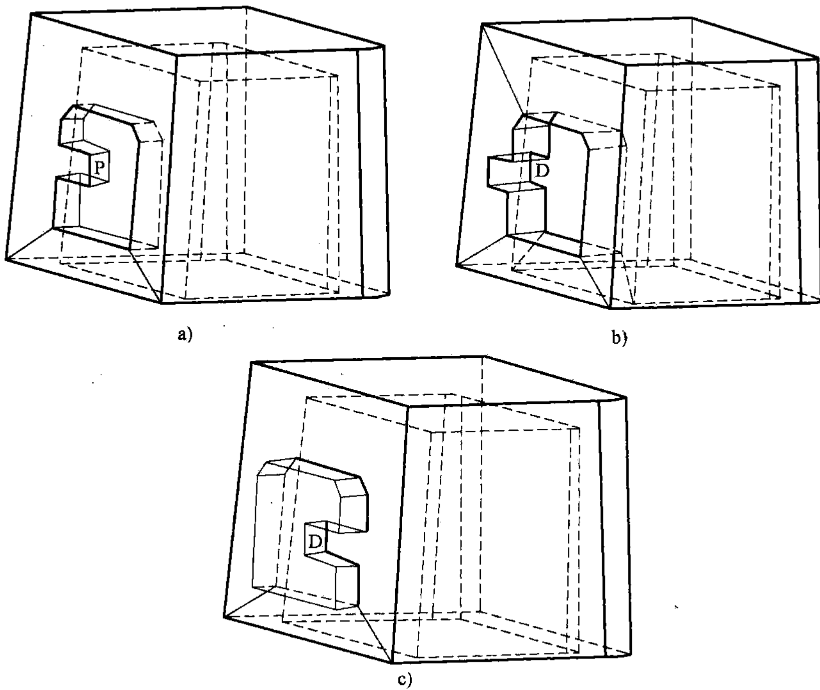
类似Ⅰ类交互成型特征，Ⅱ类交互成型特征也能进一步分类为：Ⅱ类有底凹陷、Ⅱ类贯通凹陷和Ⅱ类凸起。图 3-47 说明了各种Ⅱ类交互成型特征，粗线表示的是一些交互成型特征的切割。从此图可以看到，交互特征切割之后两特征间的相互作用。



a)　b)　c)

图3-46　Ⅰ类交互特征

a）Ⅰ类有底凹陷　b）Ⅰ类贯通凹陷　c）Ⅰ类凸起



a)　b)　c)

图3-47　Ⅱ类交互特征

a）Ⅱ类有底凹陷　b）Ⅱ类贯通凹陷　c）Ⅱ类凸起

3.6.5 认知算法

1. 混合方法

基于以上成型特征的定义，将在这里陈述结合图形处理的优势和提示为基础的识别新方法。新方法从注射制品的综合图形，搜寻一些成型次级图形的切割，来识别成型特征。用各种提示，引导切割的搜索。此方法可概括成如下五方面。

1）预测过程，决定表面性能、进入分型线、构成成型制件的 EAFEG。

2）定义候选的成型表面。

3）识别具有内部切割的成型特征。

4）识别分离和Ⅰ类交互成型特征。

5）识别Ⅱ类交互成型特征。

在1）项中，塑料制品的 B-rep 模式和它的分型线先被输入。程序决定 B-rep 模式的每个表面的性能。据此信息，建立注射件的 EAFEG。在2）项中定义所有候选的成型表面。由于负表面f_i 和正表面f_j 是成对的候选成型表面，其共同的棱线 $e_{i,j}$不是分型线。如果它们关联的 a_{ij}有 $Q_p(a_{ij})=0$，相应的负点 n_i 和正点 n_j 是一对候选者。

在3）~5）项中，各种成型特征被识别。在这些项中，切割的搜寻起很重要作用。众所周知，即使在简单的图形里，也有许多切割。在复杂的图形里，搜索所有的切割是不现实的[33]。应提示可被用来引导切割搜寻的特征。常规的提示程序，首先搜寻一些专门的弧，来满足给定特征定义的切割性能，然后验证这些弧上切割过程的可行性。用以验证的基础定理和推理如下所述。

定理 3.1：在图形上任何两次切割的环和，或是第三次切割，或者是弧分割的并集。两次切割 A_1 和 A_2 的环和（$A_1 \oplus A_2$），是指其所有元素要么全在 A_1 或 A_2 里，要么全不在两者里。

推理 3.1：给定实体和它的 EAFEG 为 G，H 是连接 G 的次级图形。所有的节点 H 为$\{n_1, n_2, \cdots n_i, \cdots\}$，$A_i$ 是关联 n_i 的一些弧。如果一些 A_c 满足如下两条件，则 A_c 是 H 的一些切割。

1）$A_c = A_1 \oplus A_2 \oplus A_3 \oplus \cdots \oplus A_i \oplus \cdots$，这里 A_1、A_2、A_3 和 $A_i \in H$

2）A_c 相应的棱线在形成封闭的实体里。

证明：A_i 是所有与节点 n_i 相关的一些弧，以致 A_i 是节点 n_i 的一些切割，A_i 从 G 上分离了节点 n_i。根据定理 3.1，A_i 的环和，是些切割或是弧分开切割的并集。因为第二条件，A_c 不能是弧分开切割的并集。

2. 提示和切割

提示和切割要从注射件其他区域的拓扑和几何特性来识别加工特征。在特征识别期间，大多必须应用拓扑关系和几何特性两者。添加给成型特征的重要特

性，可由定义3.2和表3-5给出。一些其他的几何和拓扑特性，对于成型特征的识别是很有用的。这些几何和拓扑特性，被称作成型特征的提示。下面是一些提示的例子。

提示3.1：对于成对的候选成型表面f_i和f_j，f_i和f_j之间棱边为$e_{i,j}$，且$e_{i,j}$是凸棱线。如果下面三个条件得到满足，则负表面f_i是凹陷成型特征的结构表面，而且凹陷成型特征是从型腔表面分离的，即

1）存在另一个凸棱线$e_{k,l}$，它连接到$e_{i,j}$上。

2）表面f_k和f_l，各自邻接到f_i和f_j。

3）$e_{k,l}$比$e_{i,j}$更低。

提示3.2：对于成对的候选成型表面f_i和f_j，f_i和f_j之间棱边为$e_{i,j}$，且$e_{i,j}$是凹棱线。如果下面三个条件得到满足，则负表面f_i是凸起成型特征的结构表面。而且凸起成型特征是从型腔表面分离的，即

1）存在另一个凹棱线$e_{k,l}$，它连接到$e_{i,j}$上。

2）表面f_k和f_l，各自邻接到f_i和f_j。

3）$e_{k,l}$比$e_{i,j}$更高。

提示3.3：Ⅱ类交互成型特征，f_i是它的结构表面之一，f_j是分离表面，而$e_{i,j}$是f_1和f_2的棱边。如果$e_{i,j}$的顶点V_p，由于切割存在两条任意棱线，所以选择不属于表面f_i的棱线为下次切割。

图3-48说明了提示，中心线表示分离表面，粗线表示切割后棱线。$e_{i,j}$是切割当时的棱线。在顶点V_p，存在两条凸起棱线$e_{i,k}$和$e_{k,j}$。根据提示3.3，棱线$e_{k,j}$被选择作为切割中的下一条棱线。

提示3.4：对于成对的候选成型表面f_i和f_j，$e_{i,j}$是f_i和f_j的棱边，$e_{i,j}$是凸起棱线。如果以下三个条件得到满足，正表面f_i是凹陷成型特征的结构表面。凹陷成型特征是从型芯的部分表面上分离的，即

1）存在另一个凸棱边$e_{k,l}$，它连接到$e_{i,j}$。

2）表面f_k和f_l，各自邻接到f_i和f_j。

3）$e_{k,l}$高于$e_{i,j}$。

提示3.5：对于成对的候选成型表面f_i和f_j，$e_{i,j}$是f_i和f_j的棱边，$e_{i,j}$是凸起棱线。如果以下三个条件得到满足，正表面f_i是凸起成型特征的结构表面。凹陷成型特征是从型芯的部分表面上分离的，即

1）存在另一个凹棱边$e_{k,l}$，它连接到$e_{i,j}$。

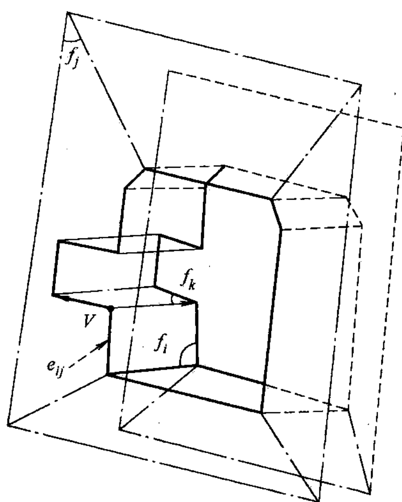


图3-48　提示3.3

2）表面f_k和f_l，各自邻接到f_i和f_j。

3）$e_{k,l}$低于$e_{i,j}$。

3. 判别分离和I类交互成型特征

分离和I类交互成型特征，两者在结构表面之间有凸起性能。下面算法的组成步骤可用于搜寻它们的切割和次级图形。

1）得到成对的成型节点(n_1, n_2, a_{ij})。

2）在图3-43所示的塑料制品上，发现三对候选特征为$(n_4, n_{10}, a_{4,10})$、$(n_1, n_5, a_{1,5})$和$(n_2, n_6, a_{2,6})$。

3）(n_1, n_2, a_{ij})产生提示。如果不产生提示，回到步骤1），否则进行下一步。

4）依据专门的切割性能，搜寻切割A_c。对所给示例，如果生成提示3.1，用$Q_c(a)=1$或0搜寻A_c。如果生成提示3.2，用$Q_c(a)=-1$或0搜寻切割A_c。

5）发现封闭环时，搜寻中止。发现结构节点集合N_c和分离节点N_s。在图3-43的示例中，$N_c=\{n_5, n_6, n_7, n_8, n_9, n_{10}\}$和$N_s=\{n_1, n_2, n_3, n_4\}$。如果搜寻研究分型线，它也中止。在此情况下，研究是不会成功的。

6）发现所有节点，它们邻接N_h，且不属于N_s；添加这些节点到N_h。从第一步运行到这一步，$N_h=N_c$。

7）重复执行步骤4），直到所有邻接节点N_h被找到，或者到达A_p的弧。如果N_c是N_h的切割，N_h和它的弧线形成次级成型图形H，则H或者是有底凹陷或者为凸起。在A_p里，另一些A_c组成一些切割N_h。N_h和它的一些弧线形成贯通的凹陷特征。另外，保留A_c到候选切割环A_p。在图3-43里，所有H的节点是$N_h=\{n_5, n_6, n_7, n_8, n_9, n_{10}, n_{11}\}$。

8）进一步分类，依据任何两个成型内表面的凹凸性能，识别成型特征分成分离成型特征或I类交互成型特征。

4. Ⅱ类交互成型特征的识别

陈述定义3.4时，Ⅱ类交互成型特征不必保持两个结构节点的凹凸性能。切割一些节点，有比一个候选弧更多的结果。成功识别Ⅱ类交互成型特征，识别过程中应正确选择的切割弧。提示3.3能用来挑选下一个正确的切割弧。有了提示的帮助，判别过程与识别分离成型特征相类似。但有时会有成功搜寻结果的提示，或者会有错误候选切割的提示。所以，认知Ⅱ类交互成型特征过程，是反复试验的过程，并能累次总积。

3.7 侧滑块和内滑杆的侧型芯生成

上节的讨论中，塑料制品上成型特征的存在会妨碍它从注射模中脱出。注射件上任何成型特征，存在与注射模相应的成型特征。对设置型腔的成型区域，侧

型芯由滑块机构驱动。对型芯上的成型区域，内滑杆系统端产生侧型芯的侧向运动。本节首先介绍滑块和内滑杆机构，然后讨论型芯和型腔成型特征侧型芯的自动生成。在本节，成型特征被认作为型芯或型腔里的一部分，除非专门区分。

3.7.1 侧滑块和内滑杆机构

1. 滑块机构

任何型腔的成型区域都会阻碍注射件从型腔分离。从型腔脱离的部分，称侧型芯。开模时侧型芯不仅沿着脱模方向运动，也沿着侧向抽拔。侧向垂直于开模的脱模方向。大多数通行的完成此复合运动的是侧向滑块机构，如图3-49所示。在图3-49a上锁紧楔压紧侧型芯，侧型芯由斜导柱驱动，斜导柱安装斜角小于25°，以使弯曲应力较小。注射模打开时，侧型芯沿着动模上的T形槽滑动。在开模行程结束时，侧型芯完全从注射件上拔离。弹簧作用的定位销顶压定位侧型芯。图3-49b说明了侧滑块系统的开模状态。

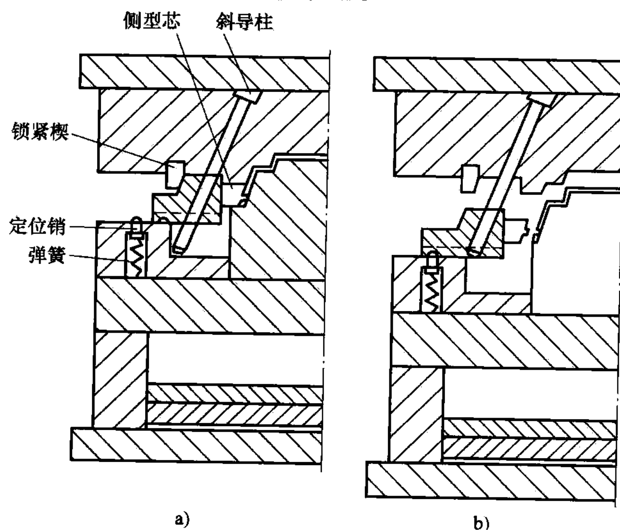


图3-49　滑块机构
a）闭模　b）开模状态

2. 内滑杆机构

型芯应布置到允许注射件以通常途径脱模顶出的位置。侧型芯要移动到位，让注射件在开模方向脱模。将侧型芯体脱离，使其成型部分获得自由。这个型芯块称为内侧成型型芯，以区别于主型芯。在图3-50上示明了这个内滑杆机构。布置滑杆使侧型芯朝里侧，又能在板外滑动。滑杆的一端安置了侧型芯，在另一末端，尾部有转轴，保证硬座块紧固在顶出固定板上。开模时，定模从注射件上分离。留在动模上的注射件仍被侧型芯粘合。开模行程将结束时，顶出板开始运

动，在脱模方向顶出注射件。同时，顶出板在脱模运动中，使滑杆朝里运动。此朝里的运动也使侧型芯向里侧移动。因此，侧型芯的成型部分从注射件上抽出。图 3-50b 说明了内滑杆机构的开模状态。

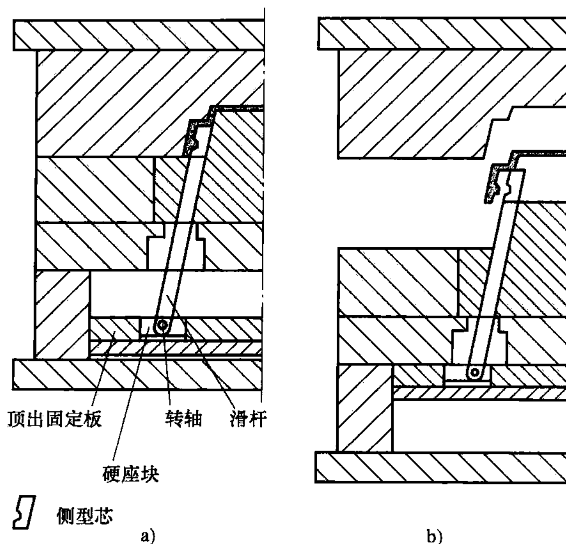


图 3-50 内滑杆机构
a）闭模状态 b）开模状态

3.7.2 侧型芯设计

型芯和型腔的每个成型特征，存在阻碍注射件从注射模上脱出的部分，称为障碍部分。区别障碍部分，取决于成型特征的类型和依附的型芯或型腔的模式。在图 3-51a 中，型腔里存在凸起区域，障碍部分是整个凸起成型特征。但在图 3-51b 中，注射件的阻挡移动的区域在分型表面上，是正表面的成型特征。在图 3-51 中，该区域标记 b 为阻挡部分。侧向的阻碍运动部分，必须连接到滑块，由斜导柱驱动。在滑块和阻碍部分之间标记 l，它们必须从型腔切开。因此，对型腔的最小侧向型芯是 b 加 l 区域。

图 3-52 所示为型芯成型特征的侧型芯。图 3-52a 中指明的凸起成型特征，阻碍部分是整个凸起区域。在图 3-52b 中，阻挡部分是型芯顶表面的成型特征的负表面。将阻挡部分和滑杆两者连接，需有个标记 l 区域。因此，侧型芯 b 由和 l 区域组成。以上讨论能看出，设计侧型芯有四个步骤。

1）定义成型特征。

2）发现阻挡注射件运动的区域。

3）确定松开侧型芯的方向。

4）从型腔上截出含有阻挡区域的部分。

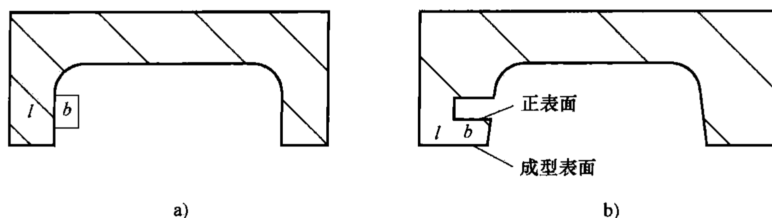


图 3-51　对型腔成型的侧型芯

a）凸起　b）凹陷

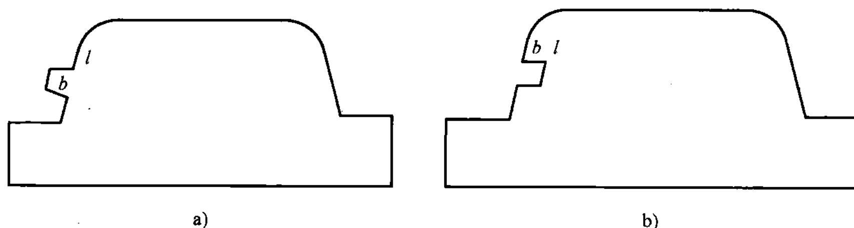


图 3-52　型芯的成型特征的侧型芯

a）型芯里凸起　b）型芯里凹陷

3.7.3　识别型芯和型腔的成型

设计侧向型芯，首先需要识别成型加工特征。3.6.5 节提出的混合（hybrid）方法适合从型芯和型腔上识别成型特征。

1. 成型的 EAFEG 定义

型芯和型腔里的凹陷或凸起，阻挡了塑料制品从注射模中脱出。因此，成型特征可分成两个类型，凹陷成型特征和凸起成型特征。凹陷成型特征是凹形表面组成的区域，也是凸起棱线环绕范围。凸起成型特征是凸状表面组成的区域，也是凹形棱线环绕范围。识别型芯和型腔的成型特征，需要精确定义各种成型特征。同样地，要定义注射件上的成型特征。每种型芯和型腔的成型特征，能用球体 EAFEG 的次级图形单值定义。EAFEG 在前一章关于塑料制品的内容中提出的，也能用来表述型芯和型腔。

2. 分离特征

定义 3.5：给定型芯和型腔的球体 EAFEG，成型图形 H 是 G 的次级图形，即 $H=(N_h,A_h,T_n(N_h),T_a(A_h))$，$H$ 被连接并有

1）在 N_c 里存在至少一个正节点 n_i，即 $C(n_i)=1$。

2）在 N_c 里存在至少一个负节点 n_j，即 $C(n_j)=-1$。

3）在 H 里所有弧线有凸形性能。

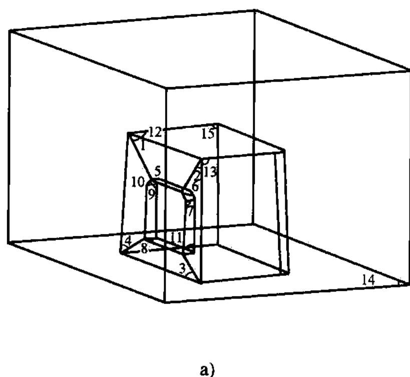
4）H 的一些切割 A_c，有切割性能。

5）H 的所有分离节点，有分离节点性能。

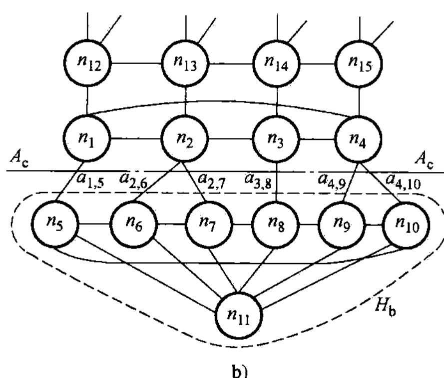
对于凹陷和凸起的凹凸形性能、切割性能和分离节点性能等的总结，如表3-6所示。图3-53说明了型腔的凸起物成型图形。凸起体上表面f_5，f_6，f_7，f_8，f_9，f_{10}和f_{11}，从型腔主体的一些表面f_1，f_2，f_3和f_4分离。因此，一些分离节点是$N_s=\{n_1,n_2,n_3,n_4\}$，一些切割$A_c=\{a_{1,5},a_{2,6},a_{2,7},a_{3,8},a_{4,9},a_{4,10}\}$，一些结构节点$N_c=\{n_5,n_6,n_7,n_8,n_9,n_{10}\}$。

表3-6　成型图形的性能

性　能	凹　陷	凸　起
切割性能	(1) $Q_c=(a_{ij})=1$ 或 $0, a_{ij}\in A_c$ (2) 顶点在$T_a(A_c)$形成的封闭环	(1) $Q_c=(a_{ij})=-1$ 或 $0, a_{ij}\in A_c$ (2) 顶点在$T_a(A_c)$形成的封闭环
凹凸形性能	$Q_c=(a_{ij})=-1$ 或 $0, a_{ij}\in A_h$	$Q_c=(a_{ij})=1$ 或 $0, a_{ij}\in A_h$
分离节点性能	型腔的凹陷体 $C(n_i)=-1, n_i\in N_s$ 型芯的凹陷体 $C(n_i)=1, n_i\in N_s$	型腔的凸起体 $C(n_i)=-1, n_i\in N_s$ 型芯的凸起体 $C(n_i)=1, n_i\in N_s$



a)



b)

图3-53　凸起成型和它的次级图形

a)型腔的凸起成型　b)凸起成型的次级图形

3. 交互成型

在3.6.4节中，注射件的交互成型特征被分成两类，称为Ⅰ类和Ⅱ类交互成型特征。相类似，型芯和型腔的交互成型特征也可分为，Ⅰ类交互成型特征或Ⅱ类交互成型特征。交互成型特征是分离成型特征和另一些特征相互作用的结果。如果切割导致交互特征，维持原始分离成型特征的切割，交互成型特征是Ⅰ类交互，否则是Ⅱ类交互。与分离成型特征相应的交互成型特征，也能分成交互凹陷或交互凸起。图3-54说明了交互成型特征的分类。

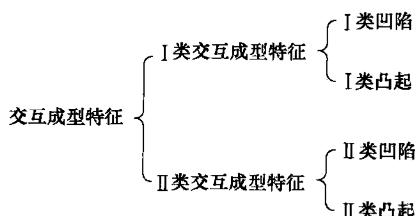


图3-54　交互成型特征的分类

4. 成型特征的识别

基于以上成型特征的定义，前面提出的混合方法能用来识别型芯和型腔上的各种成型特征。与注射件上成型特征识相比较，由提示引导型芯和型腔的识别过程更直接。从型腔识别成型特征时，对型腔的提示被利用。从型芯识别成型特征时，程序选用型芯的提示。下面是型腔成型特征的两个提示。

提示3.6：对正表面f_i和负表面f_j，e_{ij}是f_i和f_j共有的凸棱边。表面f_i是凹陷成型特征的结构表面。如果满足三个条件，表面f_i归属到型腔上。

1）存在另一个凹棱边$e_{k,l}$，它连接到$e_{i,j}$。

2）表面f_k和f_l各自邻接f_i和f_j。

3）$e_{k,l}$高于$e_{i,j}$。

提示3.7：对正表面f_i和负表面f_j，e_{ij}是f_i和f_j共有的凹棱边。表面f_i是凸起成型特征的结构表面。如果满足三个条件，表面f_i归属到型腔上。

1）存在另一个凹棱边$e_{k,l}$，它连接到$e_{i,j}$。

2）表面f_k和f_l各自邻接f_i和f_j。

3）$e_{k,l}$低于$e_{i,j}$。

3.7.4　侧型芯的自动生成

1. 方法概述

基于以上讨论，以下步骤[4]能用来自动生成侧型芯。

1）从型芯和型腔识别成型特征。

2）确定并核实各个成型特征的抽拔方向。

3）创建每个成型特征的边界盒体。

4）用型芯和型腔剪除边界盒体。

5）分辨侧型芯的相互作用。

识别了型芯和型腔的所有成型特征后，需确定每个成型特征的抽拔方向，使其沿着所有成型特征表面能自如通行。抽拔方向决定了侧型芯的运动。确定的抽拔方向对成型特征是否可行，还需要加以核实。步骤3）和4）是成型特征用于创建侧型芯时的步骤。有时两个或两个以上侧型芯，会相互交叉干涉。实际上还侧型芯重叠的情况发生。在步骤5)，程序会分辨侧型芯相互作用。

2. 抽拔方向

抽拔方向是侧型芯运动的方向，它应保证成型特征作自如抽拔，并使所有成型特征的表面必须沿着侧向通行。根据可视图形（V-map）的理论[28]，如果成型特征的表面适合此抽拔的同一方向，作为可视图形相对应的表面也是可通行的。给定表面的可视图形，在V-map单元球上的每个点，比Gaussian-map图上相应的点偏离至少90°角。因此，沿着抽拔方向自如通行的条件，是抽拔方向和

表面上任何点的法向之间的夹角小于90°。如果不能沿着抽拔方向自如通行，校核平面、圆柱和圆锥表面并不困难。但是，自由形成的表面校核是很麻烦的。因为这种表面上各点的法向是变化的。对抽拔方向与自由表面所有点的法向的夹角，全部进行计算是不现实的。要让自由表面能沿着抽拔方向自如通行，必须经实用的算法校核。为让 Bezier 自由表面沿着抽拔方向自如，Convex-hell 凸壳算法被推出用来校核。与定理3.1密切相关，有如下规则。

推理3.2：用$(p+1)\times(q+1)$确定$p\times q$的 Bezier 自由表面，控制网状点$\{\boldsymbol{b}_{i,j}=(\boldsymbol{X}_{i,j},\boldsymbol{Y}_{i,j},\boldsymbol{Z}_{i,j}),i=0,1,\cdots p;j=0,1,\cdots q\}$。$\boldsymbol{R}_{i,j}^{k,l}$是任何两向前的不同矢量$\Delta^{1,0}\boldsymbol{b}_{i,j}$和$\Delta^{0,1}\boldsymbol{b}_{k,l}$的叉积，（$i=0$，$1\cdots$，$p-1$；$j=0$，1，…，$q$；$k=0$，1，…，$p$；$l=0$，1，…，$q-1$）。如果$\boldsymbol{R}_{i,j}^{k,l}$与抽拔方向$\boldsymbol{r}$的夹角的余弦$\theta$是正的，Bezier 表面沿着抽拔方向可自如通行。

推理的证明是简单的。定理3.1的顶出方向用抽拔方向$\boldsymbol{r}$替代，如果任何$\cos\theta$为正，就能得到推理。抽拔方向$\boldsymbol{r}$和 Bezier 表面任何点的法向矢量的夹角小于90°，则 Bezier 表面是能通过抽拔方向$\boldsymbol{r}$。

3. 成型特征的边界盒体

成型特征的边界盒体是最小的立方体。此立方体包含有成型特征的阻碍部分和附加部分。创建边界盒体，首先要决定立方体的定位坐标系统。定位系统的座标轴在给定的抽拔方向上。由此，假定抽拔方向为立方体坐标系的x轴。用$\boldsymbol{r}=(\boldsymbol{r}_x,\boldsymbol{r}_y,\boldsymbol{r}_z)$描述抽拔方向，（$i$，$j$，$k$）和（$i_l$，$j_l$，$k_l$）描述各自球体和定位坐标系统。正的$x$轴能用如下方程式计算

$$\vec{\boldsymbol{r}}_l=\frac{\vec{\boldsymbol{r}}}{|\vec{\boldsymbol{r}}|} \tag{3-17}$$

考虑制造方便，坐标系x-z平面被认为垂直球坐标系的x-y平面。因此，在约束的帮助下，坐标系的y轴能用下式确定

$$\vec{\boldsymbol{j}}_l=\frac{\vec{\boldsymbol{i}}_l\times\vec{\boldsymbol{k}}}{|\vec{\boldsymbol{i}}_l\times\vec{\boldsymbol{k}}|} \tag{3-18}$$

因此，坐标系的z轴，能由下面的方程确定

$$\vec{\boldsymbol{k}}_l=\vec{\boldsymbol{i}}_l\times\vec{\boldsymbol{j}}_l \tag{3-19}$$

一旦坐标系确定，就可用所有相关表面边界盒体的最终坐标来定义成型特征的边界盒体了。型腔内凸起成型特征的相关表面就是成型的结构表面。型腔内凹陷成型时相关表面是成型特征的凸起表面和相关的分型表面。图3-55a用轴侧线图表示凸起成型特征的边界盒体。

4. 修剪边界盒体创建侧型芯

边界盒立方体并不参照成型特征的几何形状。创建侧型芯，需用成型特征表面来修改边界盒体的边界。完成这些修整，要用如下的布尔算法

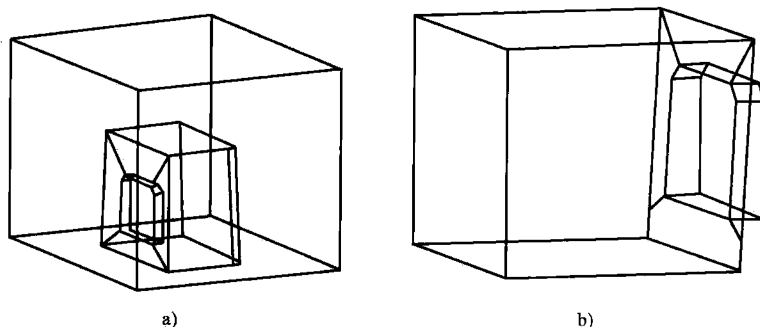


图3-55　边界盒体和侧型芯
a）凸起成型的边界盒体　b）凸起成型的侧型芯

$$SC = BB \cap P \tag{3-20}$$

式中　SC——侧型芯；

BB——边界盒体；

P——型芯或型腔。

在以上讨论中，边界盒体是最小立方体，含有阻碍和添加的成型特征部分。实际上，模具设计者是从型芯或型腔上切割一些部分来创建更大的侧型芯的。因为边界盒体是一个盒体特征表述，存在侧型芯和主体型芯/型腔之间的联结问题。改动侧型芯并不困难，设计者只需做简单的边界盒体尺寸的调整即可。侧型芯将依照所需尺寸变更。图3-55b说明了成型特征的侧型芯，表述在图3-55a上。

5. 解决侧型芯的相交问题

当两个或更多侧型芯在空间相交重迭时，会得到侧型芯的交集。Zhang 等人[34]给出以下两个规则。

规则1：如果　$SC_1 \cup SC_2 = SC_1$

则删去侧型芯 SC_1

规则2：如果　$SC_1 \cap SC_2 \neq 0$

且　$SC_3 = SC_1 \cup SC_2$

则删去侧型芯 SC_1 和 SC_2

在以上规则中，SC_1 和 SC_2 是两个侧型芯，SC_3 是个新的侧型芯。符号∪表示“联结”运算，∩表示“和”运算。规则3.1用于限制多余项目，即该项目由其他项目完全封闭。规则3.2用在与其他相交项联结。

3.8　系统实施和个案研究

在前面章节里提及的概念和方法，已经开发成以特征和联想为基础的计算机

辅助注射模具设计系统，称为 FA-MOLD[4]。本节首先描述 FA-MOLD 的开发平台和系统结构，然后介绍再 FA-MOLD 的各种功能模块，最后以图解方式来介绍案例。

3.8.1 系统结构

图 3-56 举例说明了 FA-MOLD 体系的模块。FA-MOLD 的每个模块单元，都执行计算机辅助注射模设计一组功能的方法和程序。这些模块共享并使用相同的注射模面向对象模型。

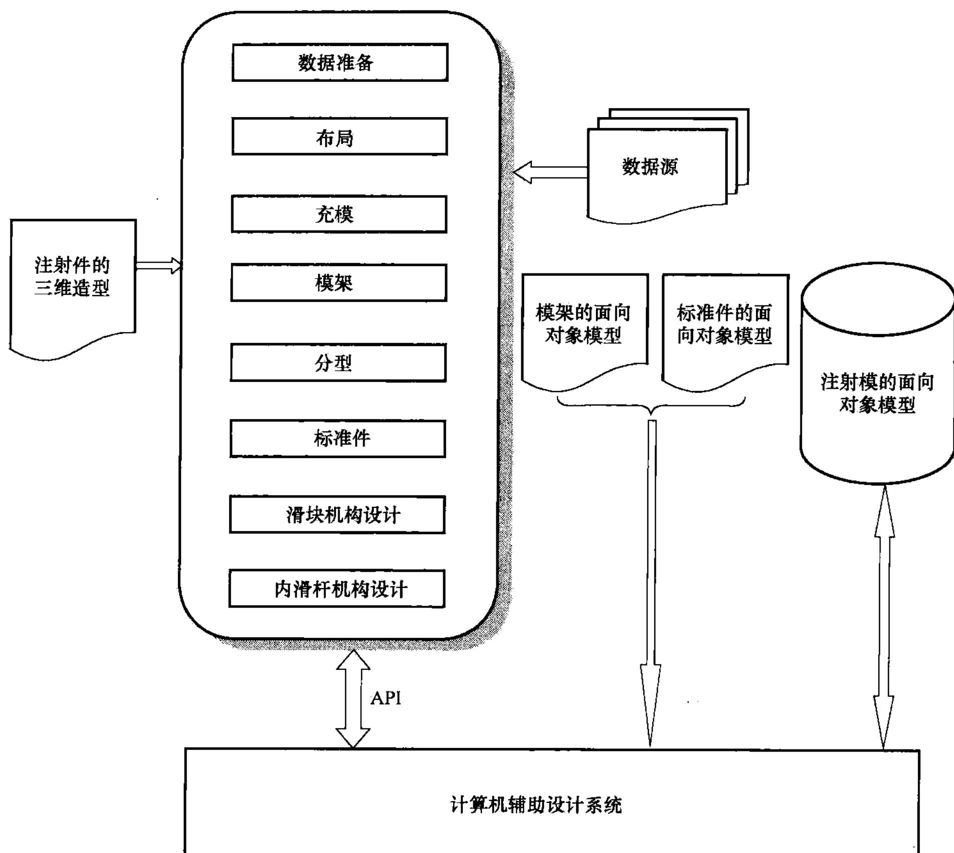


图 3-56 FA-MOLD 的系统结构

3.8.2 开发平台和编程语言

选择合适的开发平台和支持软件对开发有效的计算机辅助注射模具设计系统是非常重要的。FA-MOLD 系统运行于惠普 C100 工作站。该工作站使用惠普 HP-

UX 操作系统和惠普的用户视觉环境 HP-VUE。HP-UX 是个万能的操作系统，可以运行各种应用程序来完成各种任务。HP-VUE 还提供给 HP-UX 图形界面来使多个相关任务简单化。HP-VUE 的一些工具，如文字编辑器、图标编辑器和高级汇编语言等，应用方便，为计算机辅助设计/管理软件提供了有利的开发环境。另一方面，计算机辅助注射模具设计需要许多几何造型功能。所以 FA-MOLD 计算机辅助设计系统，使用有效的商业化计算机辅助设计/管理系统，以 Unigraphics[35] 来开发模具设计的应用软件。

Unigraphics 用 C 和 FORTRAN 编程语言来进行程序设计。以前面章节提到的运算法则，C 语言也被选择来编制 FA-MOLD 系统。UG/Open API[36] 使 Unigraphics 与第三方开发的软件之间容易对接。它可调用一大批子程序，来访问绘图终端和 Unigraphics 数据库。在 UG/Open API 的支持下，开发商可以很容易增强 Unigraphics 的性能。以 FA-MOLD 作为对接工具，用 C 语言提高 Unigraphics 的功能。

3.8.3 功能模块和图形的用户界面

1. 数据准备

"数据准备"是注射模具设计初始化的程序模块。这个模块的功能是说明塑料制品的脱模方向，输入收缩率和其他设计信息，识别塑料制品上的成型特征。图 3-57 所示为数据准备模块的界面。

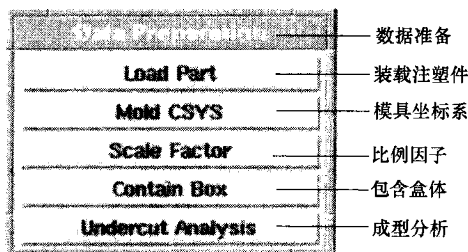


图 3-57 数据准备界面

设计新模具前，用户需要通过装载注射件按钮输入它的三维实体模型。为了说明脱模方向，用户必须沿着脱模方向设置工作坐标系的 +Z 轴，然后再按 Mold CSYS 按钮。这是因为 FA-MOLD 以 $+Z$ 方向作为脱模方向。数据准备模块的成型分析功能，可自动识别塑料制品上的所有成型特征，并将这些特征保存到注射件的特征集合中来安排布局。

2. 布局模块

"布局"模块提供计算型腔数目的功能，并自动布局型腔。布局模块界面如图 3-58 所示。为了计算塑料制品的型腔数目，用户必须输入生产参数、成本参数和注射机参数。图 3-59

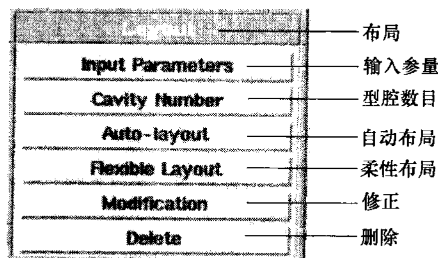


图 3-58 布局界面

所示为详细输入生产参数的界面。用这些参数，FA-MOLD 可计算出可取的型腔数目，并给用户建议最佳的型腔数目。模块具有自动布局型腔的功能。

实际设计时，用户希望更灵活地控制布局，如布局形式、布局基准和布局尺寸等。考虑了这些要求，模块加入了柔性布局功能。图 3-60 详细说明了柔性布局功能模块的界面。有了这个功能，用户可以选择平衡布局、串联形式或单一型腔布局，然后指定型腔数目和布局基准。



图 3-59 输入界面

3. 充模模块

在“充模”模块的帮助下，模具设计人员可以设计出有效的流道和浇口。在设计流道时，设计人员须要做的是选择流道的截面积和指定流道路径。这时，FA-MOLD 可以自动生成流道的三维立体造型。要注意浇口和模具布局分布之间联系，要根据浇口位置改变型腔布局。图 3-61 给出了充模模块的界面。

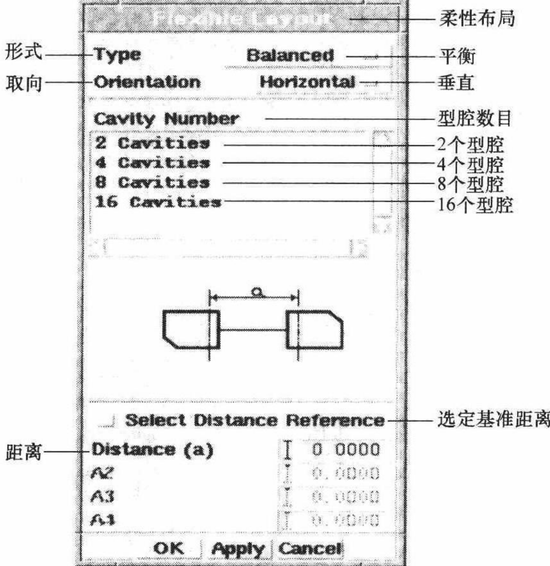


图 3-60 柔性布局界面

4. 模架模块

“模架”模块为模架的装配提供有利的设计环境。模架模块的下拉浏览目录为模架装配的方案设计提供了合适的示例。零部件在装配过程中的自动提示工具，使零部件在总装时的取向和位置很容易确定。

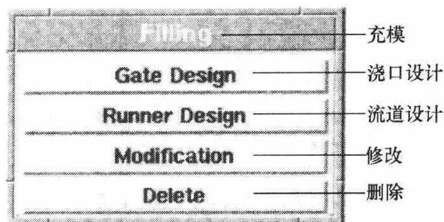


图 3-61　充模界面

图 3-62 描述了 DME 模架的下拉浏览目录的上方是显示模架结构的位置。简图下方是模架类型和次级种类的选择按钮。每个次级种类都有各自简图。次级种类改变时，简图将被更新。依照布局参数范围，在尺寸参数列表中高亮的数值和模板壁厚数值应尽可能地小些。参数列表中设置的选项分别表达了模架的宽度和长度。举例来说，选择 296 ×496 指模板宽 296mm、长 496mm。一旦在下拉浏览目录的帮助下完成了模架的方案设计，模具设计者便可以进一步调整模板和衬套的尺寸，调整螺钉和销钉的位置尺寸。图 3-63 和图 3-64 所示为调整模板尺寸和编辑螺钉位置的界面。

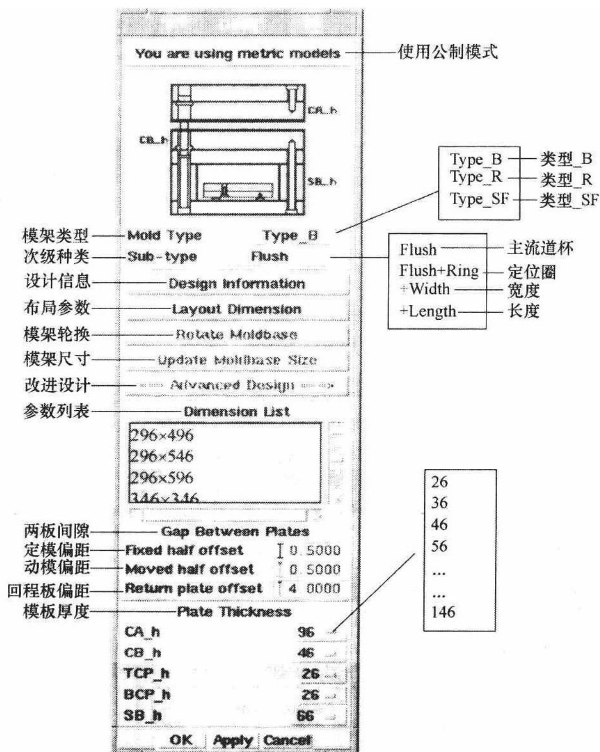


图 3-62　DME 模架的下拉浏览目录

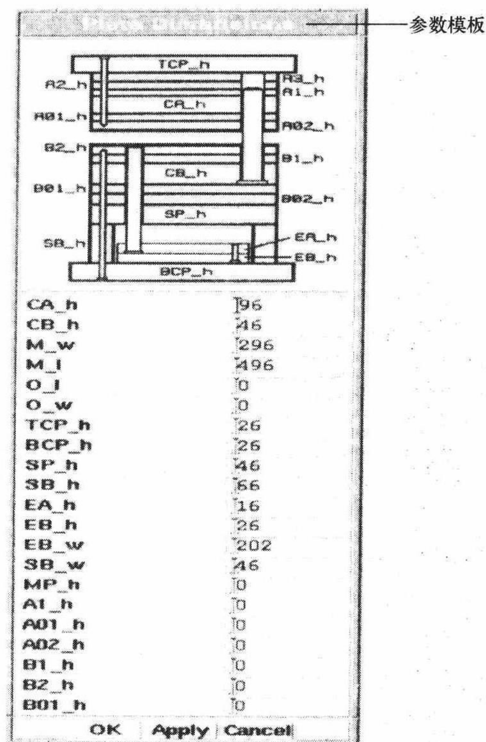


图 3-63 参数模板

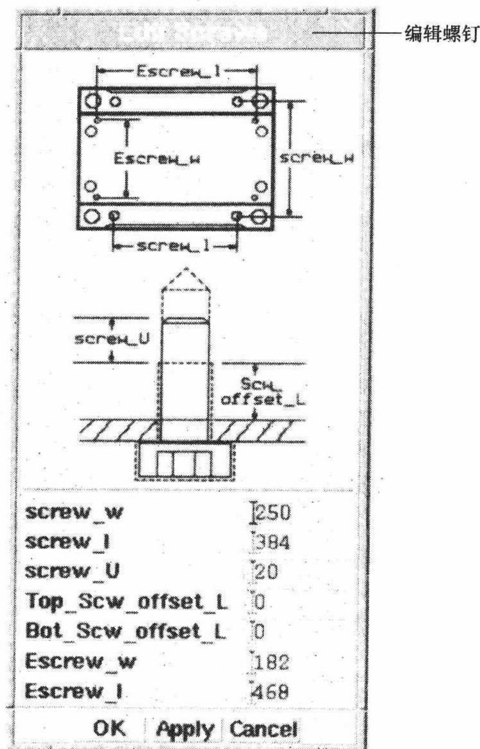


图 3-64 螺钉布置

5. 分型模块

“分型”模块是一个功能非常强大的工具。它帮助设计者根据注射件的几何尺寸，生成型芯和型腔，确定塑料制品和型腔系统的几何联系，使型芯和型腔都随塑料制品尺寸而改变。分型模块界面，如图 3-65 所示。



图 3-65 分型界面

分型模块有“插入”功能，来修补注射件上的所有的通孔。“自由形式分型”功能，可以帮助模具设计人员自由生成分型线，为注射件创建型芯和型腔。模具设计人员必须选择分型线，并要指明其延伸方向。程序会自动产生塑料制品的型芯和型腔。与此同时，型芯/型腔和塑料制品的装配关

系也已确定。每当要改进塑料制品时，其型芯和型腔就会自动更新。

6. 标准件模块

“标准件”模块建立了零件库，库中的标准件描述为面向对象的模型。在设计注射模时，该库中也准备了高级的注射模标准件。标准件模块的所有功能按钮，如图 3-66 所示。图 3-67 所示为“添加标准件”的界面。要添加一个标准件，设计人员需要在选项列表中选择标准件的参数，程序将例示预定的标准件的模型，根据面向对象模型的相应专用条件，自动确定标准件的方向和位置。

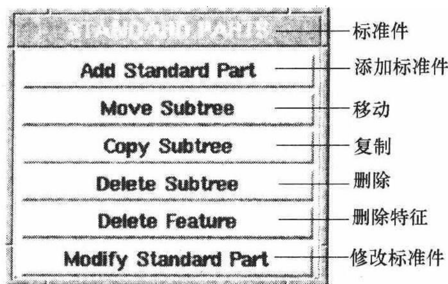


图 3-66 标准件界面

7. 侧滑块和内滑杆的设计

在“侧滑块”和“内滑杆”模块中，成型特征将从型芯和型腔中自动识别，成型这些特征的侧型芯和成型零件也将自动生成。这里，塑模设计人员需要选择滑块和内滑杆机构的结构类型，指定滑块和内滑杆的轮廓尺寸。当注射件改变时，由注射件的成型特征和侧型芯之间的几何联系，保证的侧型芯的及时更新。图 3-68 所示为滑块设计模块的功能。

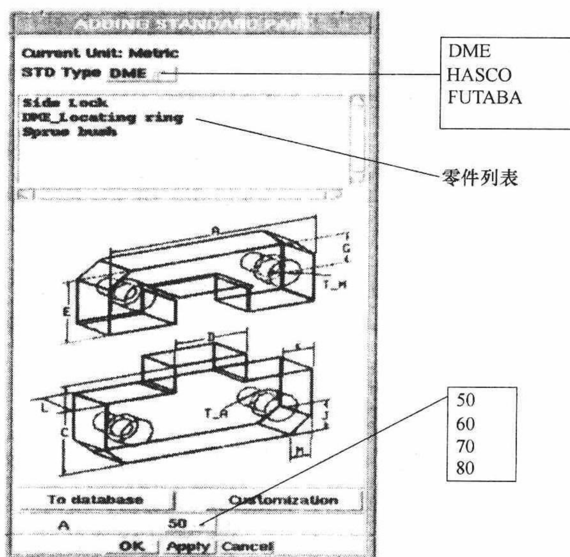


图 3-67 添加标准件

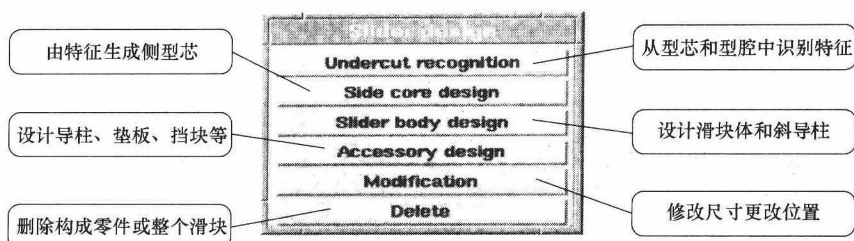


图 3-68 滑块设计模块

3.8.4 应用实例

1. 模具设计的准备

设计注射模具时为了成型示例注射制品，模具设计人员首先必须装载入塑料制品的三维模型，然后调整制品坐标系，输入塑料制品的基本信息，如材料种类和性能等。FA-MOLD 会根据工作坐标系自动调整脱模方向，为之后的设计创建包含盒体，并确认测试制品的所有成型特征。图 3-69 所示为示例制品的三维立体几何模型。图 3-70 所示为新坐标系统下，注射件的包含盒体和成型特征。

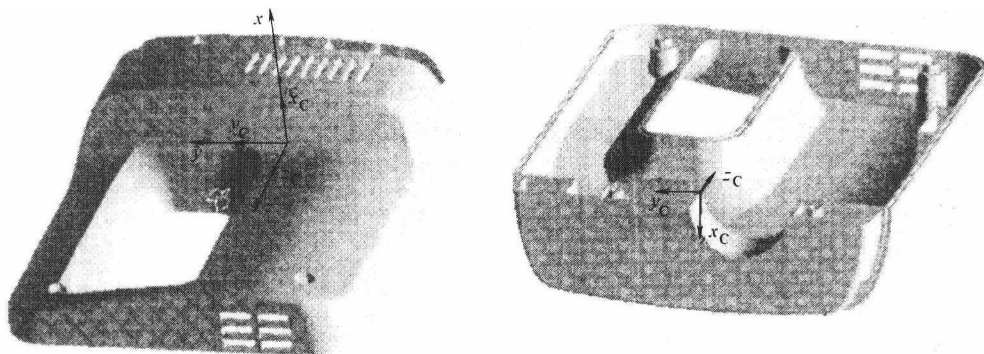


图 3-69 示例注射件的两视图

2. 型腔布局的布排

模具设计的初始化之后，模具设计人员便要进行布局设计，确定最佳的型腔数目及所需的生产和注射机参数。本例设计中所用注射机是 Engel ES 500[37]，其参数见表 3-7。在 FA-MOLD 中其最佳型腔数目为 2。FA-MOLD 还发现 6 个要由外部侧型芯成形的凹陷特征。图 3-71 所示为 FA-MOLD 推荐的布局布排。因为存在成型特征沿着特征盒体中的侧面 1，布局必须这样安排，以保证侧面 1 可以自如延伸到型腔外部。

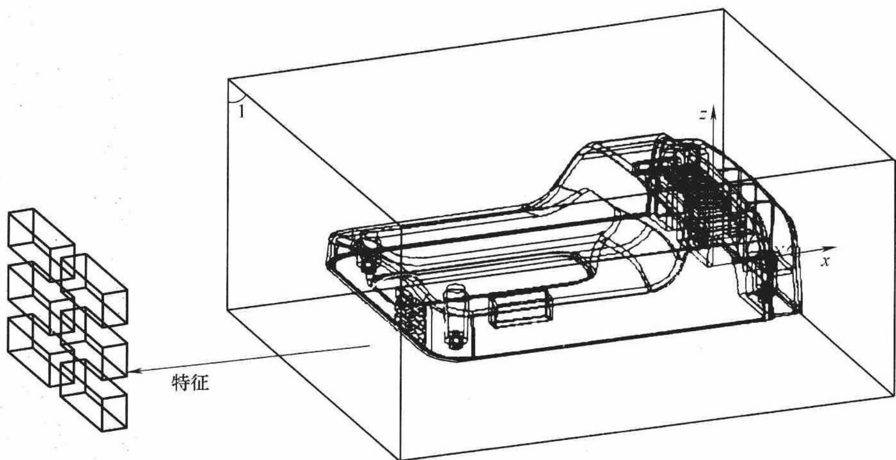


图3-70 示例注射件的新定位

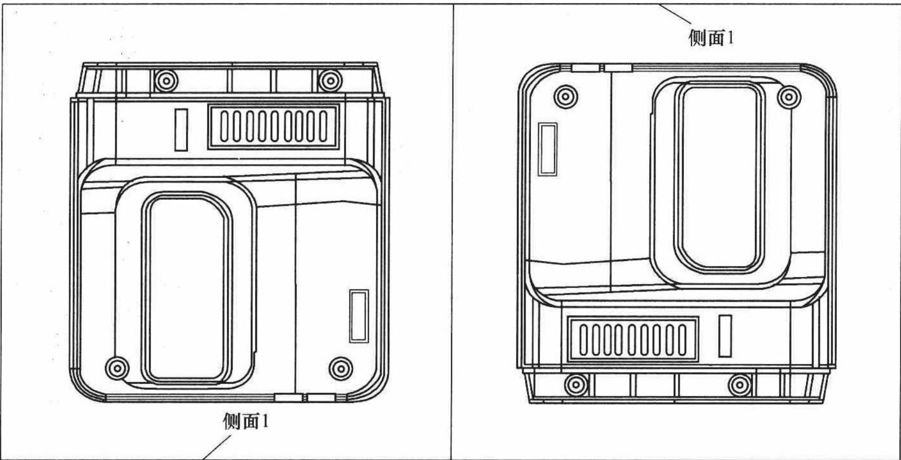


图3-71 测试注射件的型腔布局

表3-7 生产和注射机参数

参　　数	值	参　　数	值
批量	200 000	折旧期/y	6
周期/s	20	轮班数	2
密度/(g/cm³)	1.03	监管费用/(美元/y)	20 000
投影面积/cm²	245.64	锁模力/kN①	4 444.3
制品体积/cm³	139.652	注射压力/MPa①	213.9
生产时间/h	40×15	塑化率/(kg/h)①	330.2
单个型腔造价/美元	3 000	注射量/cm³①	1 192.5

① 英制单位换算而得。

3. 模架设计

布局设计完成后，模架就可以加入注射模的最终装配了。用模架的下拉浏览目录，选定 A 型模架。型腔的布局尺寸是 300 × 500，FA-MOLD 会建议的模架标准尺寸为 396 ×496。考虑到侧滑块的采用，选取尺寸为 496 × 596 的模架，如图 3-72 所示。模架由零部件组成，并用特征模式描述，所以能方便地变更模架各模板尺寸。对由相关零件组成的模架，很容易修改整个模架上的单个零件。

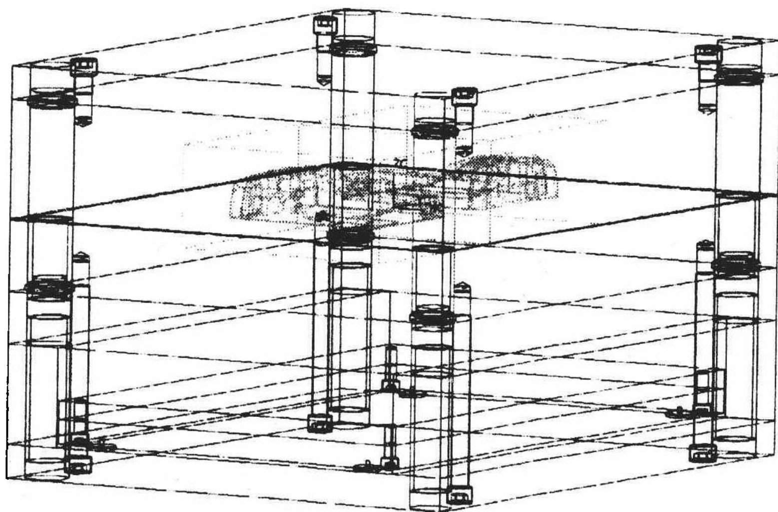


图 3-72　测试注射件的模架

4. 型芯、型腔和滑块设计

在“分型”模块的帮助下，示例注射件的型芯和型腔很容易生成。首先，所有的通孔都应该修补，然后确定分型线和延伸方向。FA-MOLD 将自动从示例件提取表面来生成型芯和型腔，如图 3-73 所示。示例制件与其型腔的装配关系也被建成。如果一个凸起要加在示例件上，型腔的几何形状将因此改变，如图 3-74 所示。

设计滑块时，FA-MOLD 首先识别所有型芯和型腔的成型特征，然后为成型特征创建侧型芯。在此设计中，型腔上存在 6 个成型特征。如果为每个成型特征设计一个侧型芯，将会互相交叉。FA-MOLD 能够通过法则 3. 2 自动地将 6 个成型特征结合成单个侧型芯。图 3-75 所示为包含 6 个成型特征的单一侧型芯。

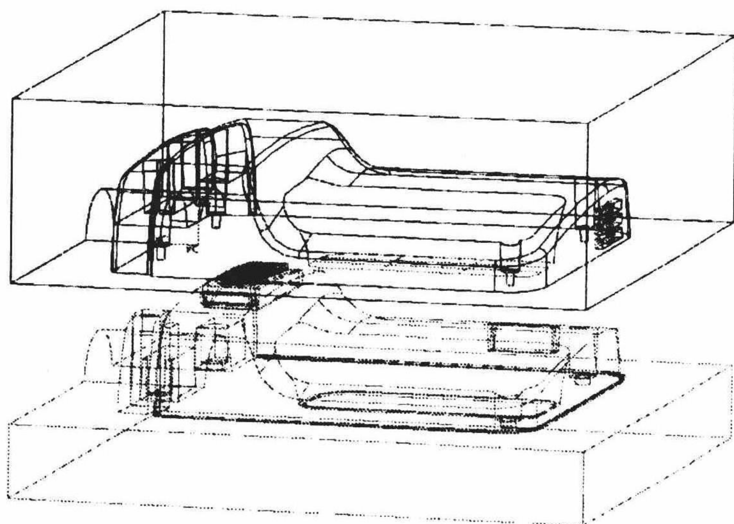


图3-73 型芯和型腔

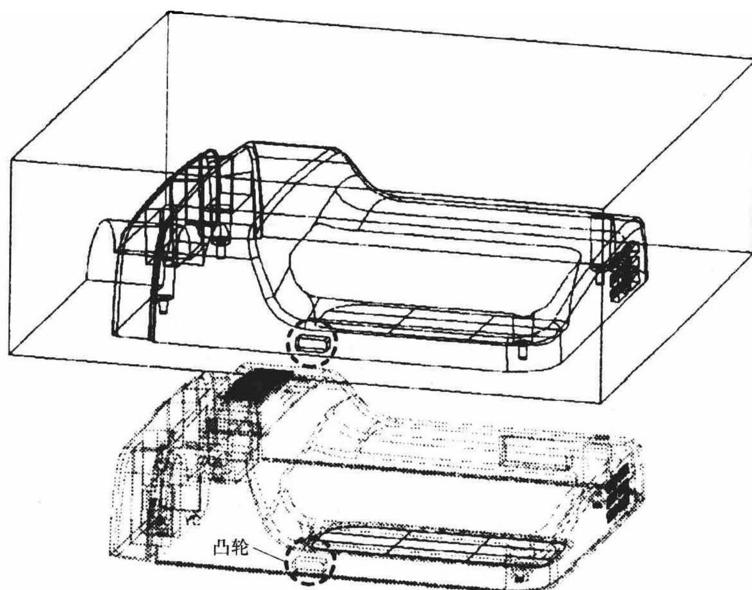


图3-74 注射件修正后的新型腔

5. 流道、浇口和标准件设计

应用“充模”模块，流道和浇口很容易生成。在设计中运用了环形布局的侧浇口和浇道。通过“标准件”模块的帮助，将各种的标准件添加到模具装配中。图3-76所示为注射模，其包括有流道、浇口、侧滑块和支撑柱等。

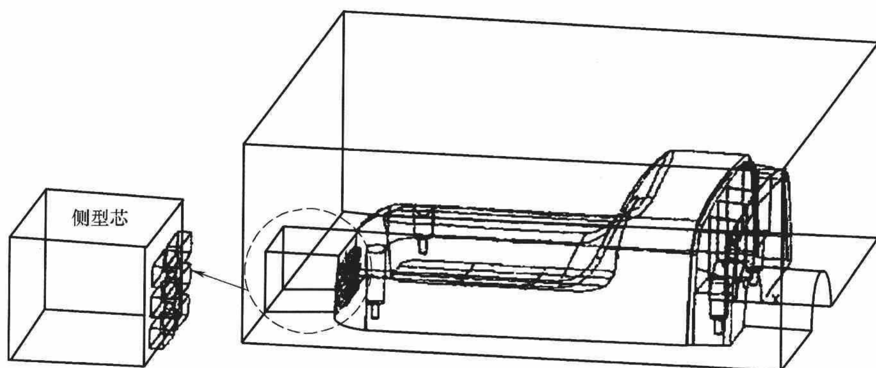


图 3-75 侧型芯的特征

图 3-76 测试注射件的完整的注射模

3.9 综述

商品化的计算机辅助设计/制造系统，起源于机械的CAD/CAM软件。但它们不提供有关注射模设计的专用功能，因此有必要建立计算机辅助注射模设计系统，使设计人员能高效地进行模具设计。本章主要介绍了计算机辅助注射模具设计自动化的计算法则，该法则适用于复杂的工业零部件。本章的关键是最佳分型的设计，包括分型方向、分型表面、型芯和型腔生成等内容。成形特征定义的介绍和提取模具的滑块和内滑杆机构的功能，对模具设计大有帮助。各种成型特征都使用的混合EAFEG，被特别提出。每个成型特征都对应单个特征图形，是完全球体EAFEG的次级图形，其含有凸起特征的一些切割性能和分离节点性能。成型特征识别新方法，很适合处理模具中人工的自由形式表面特征。除了分型设计，优化多型腔的布局设计也被提及。面向对象的三维注射模具的图解设计也被描述，模具装配对象浓缩了特征和装配信息。执行系统和实例分析基于特定的运算法则。这些法则的应用，促进了一些功能性系统被商业化的可能性。

参考文献

[1] J.J. Shah and M. Mantyla, Parametric and feature-based CAD/CAM, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.

[2] J.J. Shah, "Assessment of features technology", Computer-Aided Design, Vol.23, No.5, pp. 331-343, 1991.

[3] R.A. Malloy, Plastic part design for injection molding, Hanser Publishers, Munich, Vienna, New York, 1994.

[4] X.G. Ye, Feature and Associativity-based Computer-Aided Design for Plastic Injection Molds, PhD dissertation, National University of Singapore, 2000.

[5] S.R. Gorti, A. Gupta, G.J. Kim, R.D. Sriram, and A. Wong, "An objection-oriented representation for product and design process", Computer-Aided Design, Vol. 30, No.7, pp. 489-501, 1998.

[6] J. Rumbaugh, M. Blaha, et al., Object-oriented modeling and design, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 21-56, 1991.

[7] L.L. Chen, S. Y. Chou, and T.C. Woo, "Parting directions for mold and die design", Computer-Aided Design, 25, pp.762-768, 1993.

[8] L.L. Chen, S.Y. Chou, and T.C. Woo, "Partial visibility for selecting a parting direction in mold and die design", J of Manufacturing Systems, 14, pp.319-330, 1995.

[9] T. Mochizuki, and N. Yuhara, "Methods of extracting potential undercut and determining optimum withdrawal direction for mold designing", International J Japan Soc Prec Eng, 26, pp.68-73, 1992.

[10] K.C. Hui and S.T. Tan, "Mold design with sweep operations-a heuristic search approach", Computer-Aided Design, Vol.24, No.2, pp.81-91, 1992.

[11] M. Weinstein and S. Manoochehri, "Geometric influence of a molded part on the draw direction range and parting line locations", ASME, J of Mechanical Design, 118, pp.29-39, 1996.

[12] M. Weinstein, and S. Manoochehri, "Optimum parting line design of molded and cast parts for manufacturability", J of Manufacturing Systems, 16, pp.1-12, 1997.

[13] A.Y.C Nee, M. W. Fu, J.Y.H Fuh, K.S. Lee and Y.F. Zhang, Determination of optimal parting directions in plastic injection mold design. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 46, 1997, No. 1: 429-432.

[14] A.Y.C. Nee, M.W. Fu, J.Y.H Fuh, K.S. Lee and Y.F. Zhang, Automatic determination of 3-D parting lines and surfaces in plastic injection mold design. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 47, 1998, No. 1: 95-98.

[15] M.W. Fu, Determination of optimal 3-D parting in plastic injection mold design, Ph.D. dissertation, National University of Singapore, 1998.

[16] S.T. Tan, M.F. Yuen, W.S. Sze and W.K. Kwong, "A method for generation of parting surface for injection molds", Proc. of 4th Int Conf on Computer Aided Production Engineering, Edinburgh, UK, 1988, pp.401-408.

[17] S.T. Tan, M.F. Yuen, W.S. Sze, and W.K. Kwong, "Parting lines and parting surfaces of injection molded parts", Proc Instn Mech Engrs, 204, pp.201-219, 1990.

[18] L. Kong, "Development of a Windows-based Computer-Aided Plastic Injection Mold Design System", MEng thesis, National University of Singapore, 2001.

[19] G. Menges, and P. Mohren, How to make injection molds, 2nd Edition, Munich: Hanser Publishers, 1993.

[20] P. Dewhurst, and D. Kuppurajan, "Determination of optimum processing conditions for injection molding", International J of Production Research, Vol. 27, No. 1, pp.21-29, 1989.

[21] G. Menges, and P. Mohren, How to make injection molds, 1st Edition, Macmillan: Hanser Publishers, 1986.

[22] M. W. Fu, J.Y.H. Fuh and A.Y.C. Nee, "Undercut feature recognition in an injection mold design system", Computer-Aided Design, Vol. 31, No. 12, pp.777-790, 1999.

[23] M.W. Fu, J.Y.H. Fuh and A.Y.C. Nee, Generation of optimal parting direction based on undercut features. IIE Transactions, 31, No. 10:947-955, 1999.

[24] M.W. Fu, J.Y.H Fuh and A.Y.C. Nee, Generation of optimal parting direction based on undercut features. IIE Transactions, 31, No. 10: 947-955, 1999.

[25] D. W. Rosen, "Towards automated construction of molds and dies", ASME Computers in Engineering, Vol. 1, pp. 317-323, 1994.

[26] M.A. Ganter and P.A. Skoglund, "Feature extraction for casting core development", ASME J of Mechanical Design, Vol. 115, pp. 744-750, 1993.

[27] D. Hilbert and S. Cohn-Vossen, "Geometry and the imagination", Translated by P. Nementi, Chelsea, NY, pp. 172-271, 1983.

[28] L.L. Chen, and T.C. Woo, "Computational geometry on the sphere for automated machining", ASME J Mech Des, 114, pp.288-295, 1992.

[29] J.G. Gan, T.C. Woo and K. Tang, "Spherical Maps: their construction, properties, and approximation", ASME J of Mechanical Design, 116, pp.357-363, 1994.

[30] S. Joshi and T.C. Chang, "Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model", Computer-Aided Design, Vol.20, No. 2, pp.58-66, 1988.

[31] X.G. Ye, J.Y.H. Fuh and K.S. Lee, A hybrid method for recognition of undercut features from molded parts, Computer-Aided Design, 33:1023-1034, 2001.

[32] J. Dong and S. Vijayan, "Manufacturing feature determination and extraction Part II: a heuristic approach", Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 7, pp. 475-484, 1997.

[33] N. Deo, Graph theory with applications to engineering and computer science, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1974, pp. 68-87.

[34] Y.F. Zhang, K.S. Lee, Y. Wang, J.Y.H. Fuh, A.Y.C. Nee, "Automatic side core creation for designing slider/lifter of injection molds", Proc. of CIRP International Conference and Exhibition on Design and Production of Dies and Molds, Istanbul, Tur-

key, 1997, pp. 33-38.
[35] Unigraphics essentials user manuals, Vol. 1, Unigraphics Solution Co., Maryland Heights, MO, 1997.
[36] UG/open API reference, Vol. 1 to Vol. 4, Unigraphics Solution Co., Maryland Heights, MO, 1997.
[37] Engel, http://www.engelmachinery.com, 1999.

第4章　半自动金属压铸模具设计

4.1　概述

在介绍了塑料制品的模塑和模具设计之后，这里讨论非常相似的制造金属注射零件的过程和机构。压铸用于生产尺寸精确的简单或复杂形状的铝、镁、锌、铜等有色金属零件[1]。在这个生产过程中，熔融金属在高压下注入模具型腔，铸件在凝固后从开放的模腔中被顶出来。在本章中，压铸件这个词表示制造的零件，而压铸表示这个过程。本章将重点讨论浇注、流道、充模、模架设计等内容，重点介绍一种模具半自动设计方法，这种方法可以使基于 CAD 的模具设计系统商品化。压铸模的分型、顶出、冷却等机构的设计与前述章节的注射模具设计基本相似。

压铸件由于它的高强度和良好的尺寸准确性，被广泛应用在汽车、航空航天、电子和家用电器产业。根据所使用压铸机的不同，压铸通常可被分成两大类：热腔室压铸和冷腔室压铸。在热腔室压铸机中，注射机构是浸在与压铸机相连的加热炉的熔化金属里的。熔化金属充满热腔室，柱塞向下运动迫使熔融金属通过细颈和喷嘴进入模具。压铸机配置了主流道将金属熔料从喷嘴送入模具。注射孔置于盖板的中心。热腔室压铸机通常用于铸造镁、锌、铅和锡等合金。

在冷腔室压铸机中，柱塞和缸体不浸在熔融金属里，勺桶所盛熔料由人工或自动倾舀入“冷腔室”。压铸机通过注射套把金属送入模具。注射孔通常在盖板的中心以下留出一点间隙。冷腔室压铸机通常用于铸造铝、镁、铜等合金。

比起注射模具，金属压铸注射工具通常叫做压铸模具（die casting die），而不是压铸注射模。压铸件的质量基本上取决于压铸模具，因为压铸件是在压铸模具中成型的。模具包括两个部分，分别称定模（cover die half）和动模（ejector die half）。前者同压铸机注射系统相连，后者与压铸机的顶出机构相连。其他辅助系统包括浇注系统、顶出系统和冷却系统等。图 4-1 是典型的压铸模具装配图。如果压铸件有侧凹槽，就要使用斜导柱和滑块。长期以来，由于缺乏专为压铸模设计而开发的应用软件，设计人员只能使用基于二维的 CAD 系统来进行压铸模的设计。传统的方法在很大程度上取决于设计者的经验和专长，也需较多时间。压铸行业一直需要专门的可自动化或半自动化地进行压铸模具设计的应用软件，以减少所需的时间并节约成本。

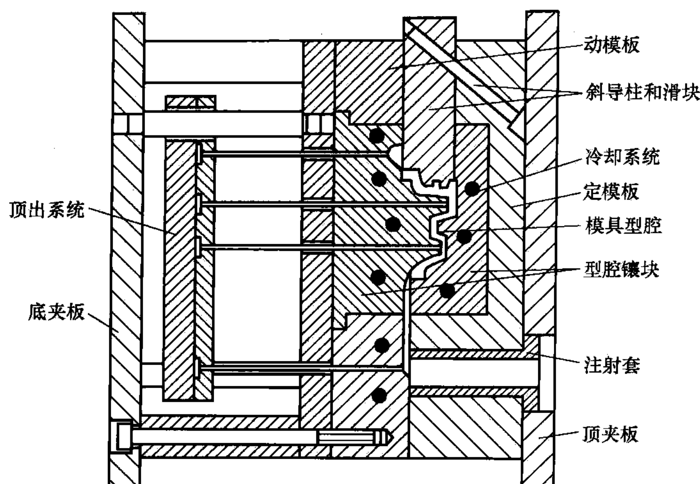


图4-1 压铸模具装配图

4.2 压铸模具设计原理

4.2.1 压铸模具设计

压铸模不但包含模架等主要组件，也含有一些其他部件，以控制金属流动，传递热量，承受压铸机施加的压力。模具设计是一个复杂的过程，包含了一些关键步骤，现简单地介绍如下。

1）设置收缩率：因为熔融金属在凝固时会收缩，原来的压铸件几何体必须用材料的某个收缩比例因子处理。

2）确定型腔数目与布局：它们决定于压铸件形状和尺寸、压铸机类型、压铸机尺寸参数限制、压铸机夹紧力和机械泵能力等。

3）浇注系统设计：这个阶段要分析流道和浇注情况。浇口和流道的类型、尺寸和位置，以及溢流槽等是由压铸件尺寸和型腔布局来决定的，要能保证合理地将熔融金属注入模具型腔。

4）模架设计：定好型腔数目和布局，选个适当的模架来完成布局方案。标准模架所采用的整体尺寸范围是顶出板必须完全覆盖或者包含所有的型腔区域，并在它的边界区域内。

5）分型设计：沿着所选分型线创建分型表面，最终将型腔分成两半——型芯块和型腔块。它们都要做成同压铸件相反的形状。

6）侧滑块机构设计：如果压铸件有侧凹槽，就会阻碍开模。斜导柱和滑块的设计，应该便于开模和从模具中取出压铸件。

7）冷却系统设计：冷却系统是压铸模所必备的，它由模具和镶块中的水管孔组成，能将热量从模腔中排出。冷却系统应该位置恰当、孔距合理，以达到快速和均匀冷却，而且不能影响顶出系统和滑块机构。

图 4-2 所示为 CAD 的压铸模设计过程。从输入压铸件模型到输出完成的模具设计装配图，设计任务主要包括布局设计、浇口设计、模架设计、分型设计、顶出设计、冷却设计、侧滑块设计和标准件设计等。

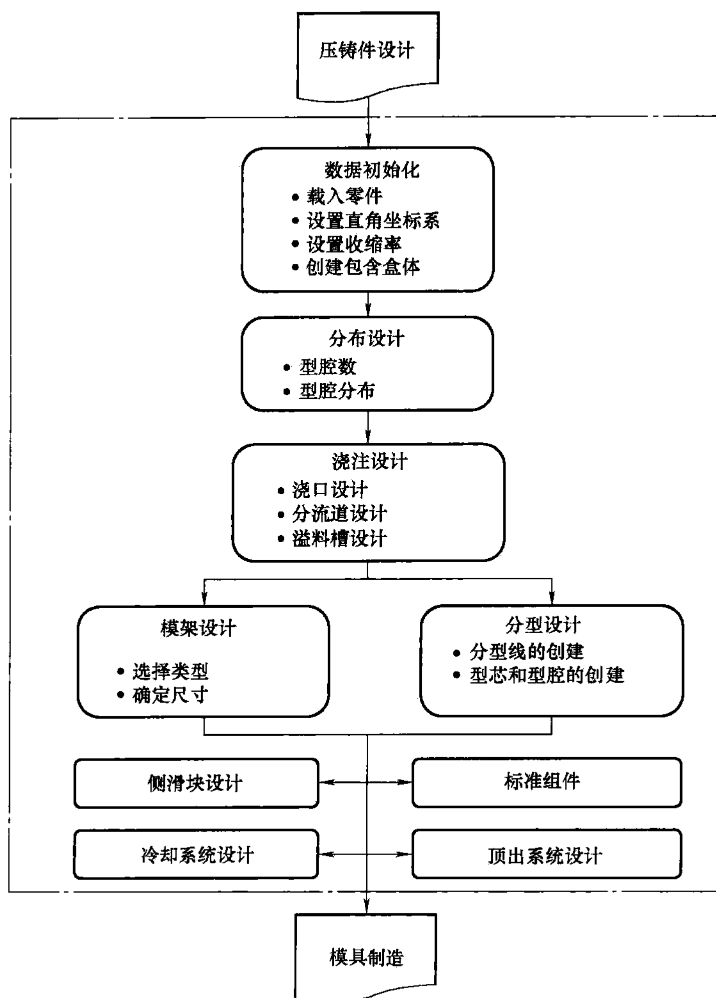


图 4-2 CAD 的压铸模设计过程[2]

4.2.2　浇口和流道系统设计

浇注系统是熔融金属进入模具型腔的一系列通道，如图4-3所示。它由以下几个浇注元件组成：

1）浇口。分流道接近型腔时，它变成一个狭缝状的小孔接通型腔，称为浇口。连接浇口和分流道的结合部分叫做浇口通道。浇口和浇口通道对引流导金属熔料有重要作用。它们能使熔融金属正确地填充到型腔中。这里所说的浇口是浇口和浇口通道的总称。

2）分流道。分流道是位于分型线上的通道，它将液态金属从主流道注入浇口。它可根据要求分成两个或两个以上，以引导流体流向各个位置。

3）溢流槽。溢流槽通常是放置在浇口相对一侧的小口腔，用来吸取不需要的非金属杂质。

4）注射套（主流道）。注射套或者主流道的里腔，形成了浇注系统的一部分。

由于在压铸模具中的流动和热效应，浇注铸件的大小、形状和位置对模具性能的影响是非常大的。要设计好浇注系统来保证将金属熔料成功地注入型腔。浇注系统还必须与压铸机协调，对于不同的压铸机，专门的浇注系统设计是有差别的。通常，浇注系统的设计是逐步完善的过程，许多研究者都在研究概括浇注系统的设计原则。因此，一定可以找到能自动化或半自动化的设计方法来设计这些被重复使用的浇注元件。

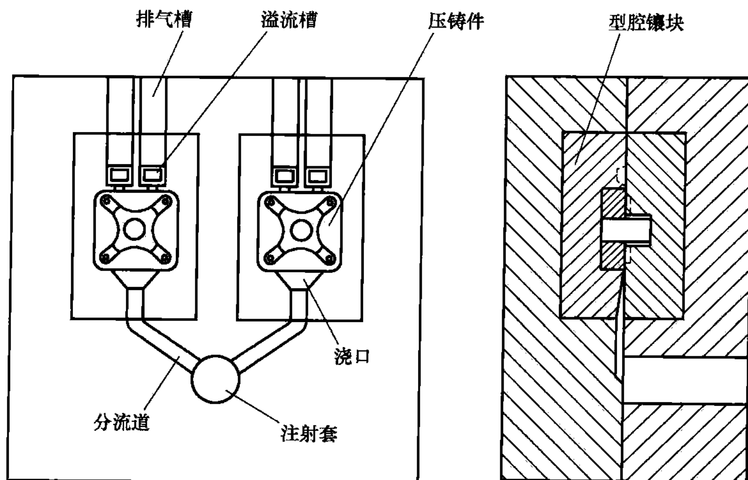


图4-3　压铸模的浇注系统[3]

4.2.3 模架设计

典型的压铸模架有多达50个零部件。为所有零部件逐一建模是非常繁琐且费时的，因此，应找到设计系统中自动生成模架的方法。为了便于标准模架的自动生成，各种零件和模架装配件应事先在模架库中建模并储存。所有的装配零部件都应是参数可变的模型。它们的尺寸会随同指定型号和参数的模架而变更。从具有参数的样品目录中自动生成模架，需要一个数据库来支持。因为标准模架都是商品化的，所以可很方便建立这样一个数据库。此外，还需要有一个用户界面，使用户选择所需类型和尺寸系列的模架，用户只需点击界面，系统就会自动进入想要的模架。这种方法的流程框图，如图4-4所示。

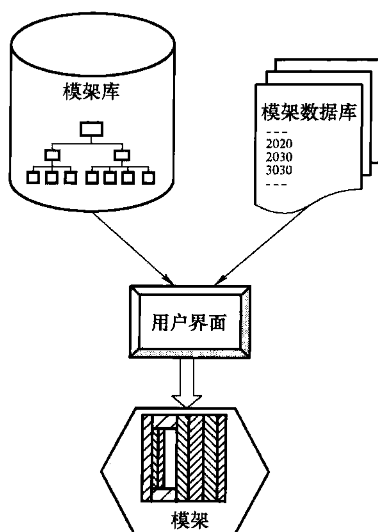


图4-4 模架自动生成流程框图

4.3 计算机辅助压铸模具设计

将CAD软件用于注射模具和压铸模具设计，可方便地使用知识型数据库，而且容易改变设计结构和细节，使设计效率显著提高。基于实体和特征建模的CAD系统的开发，使三维模具设计变为可能。目前，三维CAD软件，如UG[4]、Pro/E[5]和SolidWorks[6]在注射和压铸模具设计领域已经有了很广泛的应用。

然而大部分CAD系统只提供几何造型的功能，造型和草图绘制很方便，但它们并不能提供设计者需要的注射和压铸模具设计的知识和模块。于是一些“附加”了相关功能的软件就在这些高层次的三维造型平台上被研制开发出来，以简化注射模具的设计过程，如IMOOD™、Moldwizard[4]和IMOLDWorks™[7]等。由于这些平台给开发人员提供了功能强大的开发接口，其完善的用户界面和编程模式，使附加软件的开发和应用变得更简单、快速。这些附加软件在节省时间和成本方面，比CAD平台更有优势。但目前关于开发附加压铸模具设计应用软件的信息，还未见报道。

4.3.1　压铸模具的自动化设计

长期以来，压铸模具的构形与设计是依靠工程师的经验，人工操作的。没有任何关于自动化或半自动化的全部或部分压铸模具设计过程的报道。虽然金属压铸行业对自动化或半自动化的模具构形与设计方法有强烈的需求，但直到1997年这个问题才引起了关注。从 Mehalawi 和 Miller[8] 的总结中可以看出，在计算机辅助压铸模具设计中几乎没有从 CAD 模型中提取信息的办法，因而在这个领域无人问津。他们在研究中提出了事例推理 CBR（case-based reasoning）的方法来自动进行模具构形。这种方法需要有一个智能化压铸件数据库。其中的压铸件按照其形状用外观来表示。模具里配置的压铸件，其形状描述的记录放置在数据库里。为新压铸件设计模具时，系统搜索数据库，并通过相似度评估来选择同新压铸件最相似的压铸件。然后选择这个构形作为新模具设计的起始点。所选的配置有助于选择创建一副模具所需的一整套零部件，并确定它们的空间分布。换句话说，新模具的设计将基于储存在数据库中的压铸件。这项研究集中在整个压铸模的自动构形上，但对于设计个别压铸件却没有详细的数据。关于该方法的进一步开发没有人提出，也没有关于这方面软件应用的报道。

4.3.2　浇注系统的计算机辅助设计

在模具设计中，浇注系统的设计是重要的步骤，浇注系统的计算机辅助设计正在受到关注。一些浇注系统的辅助设计已经实现，而且像 CASTFLOW™[9] 和 MAGMA™[10] 等软件包也已上市了。CASTFLOW™ 能迅速生成浇注系统的三维线框模型，能将模具中金属流体的压力和速度要求与压铸机的注射量相适应。这个线框模型可提供给制造者用于生成刀具路径。不过这个应用软件聚焦在流动分析上，仅限于分流道和浇注系统的设计。此外，线框的三维模型只能定义一个对象的边界，其外观缺乏定义，所以可能会产生视觉的假象。MAGMA™ 是纯粹的模拟应用软件，可以帮助避免浇注和进料产生问题，缺乏一个完整的模具设计解决方案。

为了改进模具设计的过程，必须找到能实现自动或半自动浇注系统设计的方法。但是，文献研究的结果表明，这一领域还是空白的。研究者已经进行了一些对注射模具的进料和分流道系统的自动化设计。Irani 等人[11] 曾提出了注射模具浇注系统的自动化设计方法。他们将 CAE 仿真同迭代设计和基于特征的数据库合成在系统 AMDS 里。设计目标是模拟塑料熔体流动同时注入所有型腔。浇注系统的设计包括确定浇口的数量、位置和种类等。分流道分布在配置阶段就确定下来，浇注元件的尺寸在确定参数阶段设置。自动化设计靠初始试验浇口设计来完成，用一些量化的性能参数来评估新设计，并多次进行重新设计直到获得可行

的设计。Lee 和 Kim[12]修改了以往的方法，通过保压模拟来考虑熔体充满及保压时熔体的变形，从而确保所有的型腔在一致的压力下进行填充。改进后的方法，可以在多腔模中保证各型腔注射件有更均匀的物理质量，也适用于有不同注射件的组合型腔模具。

上述方法局限于注射模具的进料和分流道系统的设计，它们都依存于充模模拟应用。但是，这些方法是参数设计和基于特征设计的范例，从而对压铸模具的浇注系统自动化设计提供了参考。

Tu 等人[13]致力于展开压铸模具浇注系统的参量化设计。他们在研究中，事先建好浇注几何体的参数化实体模型的原型，并将其储存在浇注数据库目录中。当 CAD 模型从原装备制造商（OEMs，original equipment manufacturers）取得后，这些浇注元件从浇注库中被选择和提取出来，并确定所需的尺寸和位置。然后将这些浇注元件通过布尔操作添加到元件的实体模型中去。这样可有效缩短实体创建所需的时间。在使用标准的浇注特征时，要把 OEM 模型修改成压铸模具的模型。在工作中采用了快速构建模型的方法，从而解决了模拟过程中的网格生成问题。

4.4 型腔布局和浇注系统设计

压铸过程中，熔融金属合理地充入模具型腔很重要。因此，设计压铸模时，浇注系统的设计是非常重要的。为了取得良好的浇注系统设计效果，应考虑以下几个方面的问题。首先是射入模具的熔融金属的注射总量，一般由模具型腔的数目决定。其次是浇注系统的大小，它直接影响模具的工作状况，所以应该计算准确。第三是保证浇口的形状和压铸件的浇注模式相适应，这也是很重要的。本节将要说明对这三方面的分析和确定方法。

4.4.1 型腔数目的确定

采用多型腔模具可节省劳动成本，提高生产效率。但是，增加型腔数会使模具加大，也需要更大的压铸机，这将增加模具和压铸机的成本。

型腔数目受多种因素影响，如交货要求、所允许的模具成本和压铸机的注射量等。前两个取决于市场的行情动态，设计师必须根据最新资料考察交货和成本问题。当选择某台压铸机时，要预知它的工作能力。因此，型腔数目的选择必须使成本合理，技术允许。下面将着重介绍压铸机注射量对型腔数目的影响。与压铸机相关的参数，包括夹紧力（锁模力）、最高流量及压铸机大小等，基本上都是确定型腔数目的主要依据。

1. 基于夹紧力的型腔数

压铸机要用的足够夹紧力将模具的两个半模合在一起，因此合模力必须超过模具内部产生的力[14]。因此，最大型腔数目 N_{cf} 可在用以下公式计算

$$N_{cf}=\frac{F_c}{IA_p p_m} \tag{4-1}$$

式中　F_c——最大夹紧力，单位是N；

I——冻结效果的无量纲因子，一般为1.5~3.0；

A_p——每个型腔及其溢流槽和分流道的投影面积，单位是 mm^2；

p_m——金属熔料最大压力，单位是MPa。

2. 基于最大流率的型腔数

流量代表了压铸机注射系统生产的能力。它描述了熔融金属通过注射系统每秒钟注入型腔的体积。模具所需的流量不应超过该压铸机能供给的能力[14]。基于这原则，最大型腔数目 N_{fr} 可在用以下公式计算

$$N_{fr}=\frac{Q_{max}\times T_{max}}{V} \tag{4-2}$$

式中　Q_{max}——压铸机能提供的最大流量，单位是 mm^3/s；

T_{max}——允许的最大充模时间，单位是s；

V——每个型腔及其溢流槽和分流道的体积，单位是 mm^3。

3. 基于注射机大小的型腔数

压铸机拉杆间的距离决定了机械模具可取的最大尺寸。选择型腔数，一定要保证将所有型腔镶块包含在模具中并留有充足的余地。假设型腔呈长方形阵列，则最大型腔数为

$$N_{ms}=(\mathrm{int})\left(\frac{L_{die}-L_{mar}}{L_{ins}+0.5L_{dis}}\right)\times(\mathrm{int})\left(\frac{W_{die}-L_{mar}}{W_{ins}+0.5L_{dis}}\right) \tag{4-3}$$

式中　L_{ins} 和 W_{ins}——型腔镶块的长和宽，单位是mm；

L_{die} 和 W_{die}——所选模具最大允许的长和宽，单位是mm；

L_{mar}——模具和镶块边缘的最小间隙，单位是mm；

L_{dis}——两镶块之间的最小距离，单位是mm；

int——将已知数进行取整数的数学运算。

4. 型腔数的选择

根据已知条件，系统能用以上公式计算出 N_{cf}、N_{fr} 和 N_{ms}。实践证明，压铸模中最频繁使用的是单腔模。如果必须要用多腔模，所设计的型腔数就不能大于 N_{cf}、N_{fr} 和 N_{ms} 中的最小值。设计人员还应该综合考虑经济和技术条件，以选择能

满足全部要求的型腔数。

4.4.2 型腔布局的自动生成

型腔数目确定后，下一步就是在模具中安排布局型腔了。一些因素可能影响型腔的分布，包括压铸件形状、型腔、浇口位置和压铸机类型等。

压铸件的形状可以非常复杂，所以在安排型腔布局时会有很大困难。为了解决这个问题，可以创建一个包含盒体，这样该产品将被视为单独的块不管其形状有多复杂。包含盒体是通过下面的步骤来创建的。

1）搜寻压铸件的边界，并决定最大三维尺寸 X_p、Y_p 和 Z_p。

2）输入包含盒体和制件最外边界之间的余量，如 dx_1、dx_2、dy_1、dy_2、dz_1 和 dz_2。

3）定义侧表面，它与浇口相连，并朝向分流道入口。

4）用导出尺寸 X_c、Y_c 和 Z_c 生成包含盒体。

5）以特征的形式记录包含盒体内的信息。

图 4-5 显示了一个包容盒体和压铸件。包容盒体可以沿分型表面分成对半两部分，压铸件的模塑型腔也就被分成两个部分。在压铸模具设计中，根据两型腔间的空间关系设置为圆周形、平衡或不平衡模式。压铸模设计的布尔模式类似于注射模。不过，一副注射模可有多达 96 个型腔，而压铸模的型腔数通常不会超过 6 个。3 ~ 4 个型腔的压铸模具是最常见的。为简化型腔布局设计，一些布局

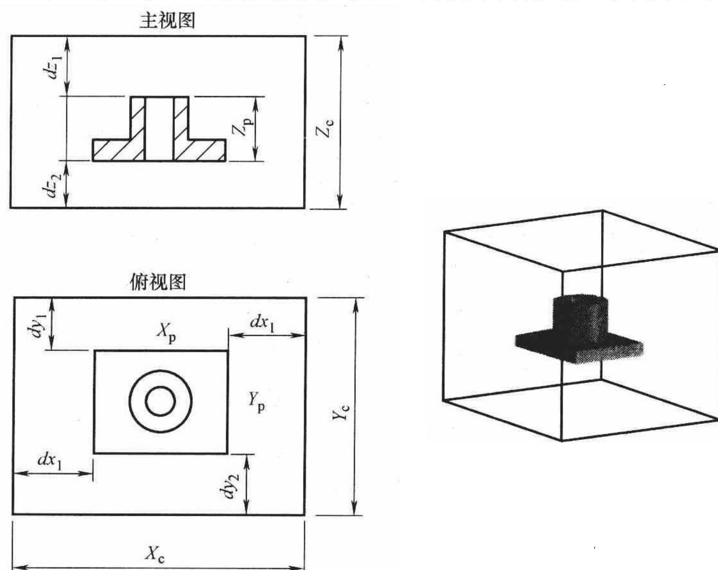


图 4-5 压铸件和包含盒体

方式会被定义在系统中。表4-1总结了一些常用的布局模式及其应用。设计者可以选择一个合适的模式与型腔数和压铸机类型相适应，并指定其相关间距。然后，系统会根据布局模式自动安排型腔的相应布局。

表4-1　型腔的布局模式及其应用

模　式	简　图	应用
非平衡模式		这组模式只适合注射口不在注射料筒中心位置的冷腔室压铸，型腔数可以是奇数或偶数
平衡模式		这组模式用于注射口在注射料筒中心位置的热腔室压铸和冷腔室压铸，型腔数为偶数
圆周模式		这组模式可以用于热腔室压铸和冷腔室压铸，所有型腔有相等的流动距离，但加工成本较高

4.4.3　确定浇注系统参数

长期以来，设计压铸模具的浇注系统依赖经验或一些简单的经验公式。压铸模制造者和研究者要对流体力学和压铸机、泵的特征有更好的理解，才能完成浇注系统的正确设计。Allsop和Kennedy[15]提出了一种计算方法来计算型腔充模时间、浇口流速、泵流量（流动速率）和浇口面积等，以符合模具和压铸机的运

转要求。这种方法称为 $P\text{-}Q^2$ 技术或 $P\text{-}Q^2$ 图表。这技术结合了压铸机和模具的特征曲线，能够估计模具在压铸机上的工作情况。

$P\text{-}Q^2$ 技术对确定模具在特定压铸机上工作时最为常用。模具设计者可按惯例使用专门设计的换算方法，或者使用预先画好的图表。这些换算或线图建立在 $P\text{-}Q^2$ 关系上，反映出专用材料和压铸机的特性。

使用这些换算式或图表需要人工操作。在下一节中，会介绍基于 $P\text{-}Q^2$ 技术的算法，这种算法可以使浇口设计计算机化。用户只要输入数值，计算机就会计算、比较数据，并自动输出优化的结果。通过这种方法，用户不需要手工绘制图表和计算结果。根据任何已知的流量（柱塞位移速率），$P\text{-}Q^2$ 图表能确定压铸机对金属流体应施加多大压力才能将其注入浇注系统。

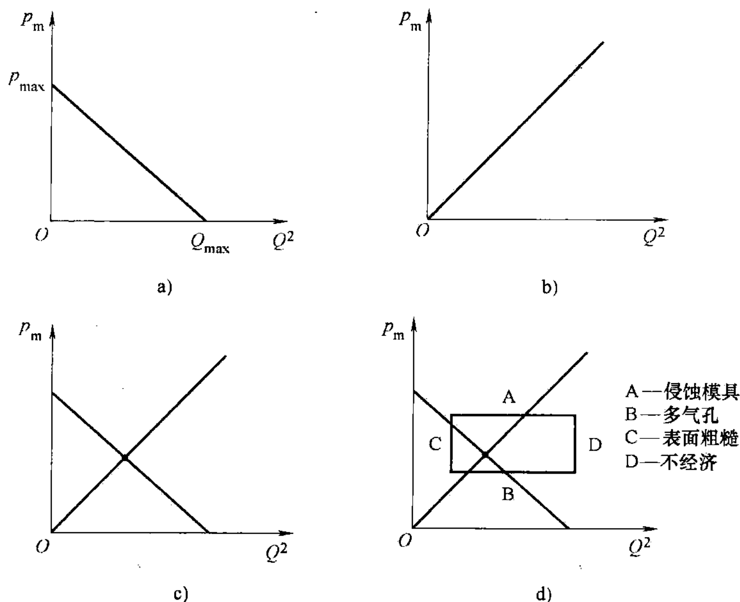


图 4-6 $P\text{-}Q^2$ 线图和控制“窗口”

a）压铸机的特性曲线 b）模具的特征曲线

c）压铸机和模具特性曲线组合的交点 d）浇注条件的控制窗口

1. 压铸机的 $P\text{-}Q^2$ 线图

实验表明，压铸机注射系统在充模过程中随着流量增加金属压力将下降。如果用纵轴代表金属压力，水平轴代表流动速率的平方，压铸机的特性曲线是一条直线，如图 4-6a 所示。该线与纵轴的交点是在柱塞行程前端时金属的瞬时压力，而它与水平轴的交点就是注射工作（dry shot）流量。它们的数学关系可以由下式表示[14]

$$p_m = p_{max} - \frac{p_{max}}{Q_{max}^2}Q^2 \tag{4-4}$$

式中 p_m——已知流量 Q 时的金属压力，单位是 MPa；

p_{max}——柱塞抵达行程前端时的最大金属熔料压力，单位是 MPa；

Q——流量，单位是 mm^3/s；

Q_{max}——柱塞抵达行程前端的注射工作速度时最大流量，单位是 mm^3/s。

2. 模具的 P-Q^2 线图

Allsop 和 Kennedy[15]指出，金属熔料在浇口的流速，或称为浇口速率与金属压力的平方根成正比，可用以下计算式表示

$$v_g = C_d\sqrt{\frac{0.002p_m}{\rho}} \tag{4-5}$$

式中 v_g——浇口速率，单位是 m/s；

C_d——模具的消耗系数；

ρ——金属密度，单位是 g/cm^3；

p_m——金属压力，单位是 MPa。

由于流速 Q 是由浇口面积和浇口速率得出的，因此式（4-4）变成如下形式。

$$p_m = \frac{\rho}{2\times10^9A_g^2C_d^2}\times Q^2 \tag{4-6}$$

式中 A_g——已知的浇口面积，单位是 mm^2。

因此，另一条原点的料线可以画在同样的坐标上。表示模具的特征曲线，如图4-6b所示。与压铸机的注射系统相反，模具中金属压力随流量增大而增大。

3. 确定充模时间和浇口速率

压铸机特征线图与模具特征线图如果相互分离，它们对模具设计师是没有意义的。把压铸机特征线图加到模具特征线图上，就好像把模具放到压铸机上。压铸机及模具的特定组合的流量 Q' 可从两条直线的交点得到，如图4-6c所示。然后用式（4-7）和式（4-8），计算出充模时间 t 和浇口速率 v_g

$$t = \frac{V_t}{Q'} \tag{4-7}$$

式中 t——充模时间，单位是 s；

V_t——模具中所有型腔及其溢流槽和分流道的总体积，单位是 mm^3；

Q'——已知的流量，单位是 mm^3/s。

$$v_g = \frac{Q'}{1000A_g} \tag{4-8}$$

式中 v_g——浇口速率，单位是 m/s；

Q'——已知的流量，单位是 mm^3/s；

A_g——浇口面积，单位是 mm^2。

浇口速率和充模时间是两个重要因素，它们反映了模具充填情况，对压铸件质量有明显的影响。金属熔料压力低，亦即浇口速率低，将导致压铸件里产生气孔和气孔率增加；金属压力高，亦即浇口速率高，将会导致模具侵蚀严重。另一方面，流动速率低，亦即充模时间长，将造成压铸件表面质量差。充模时间短压铸件表面质量就好些。但是，如果充模时间太短压铸将会不经济。因此，其最低值取决于表面粗糙度要求。表 4-2 总结了确定各种合金充模情况的 t 和 v_g 的边界值的规则[16]。基于这些规则，在图 4-6d 的 P-Q^2 线图上使用一个"窗口"，能解释得更清楚。如果压铸机曲线和模具曲线的交点落在控制窗口内，充模条件就可以满足，但不一定是最佳的。

表 4-2 影响 t 和 v_g 限制的规则

合金	浇口速率 v_g/(m/s)	充模时间 t/ms		
		表面质量好	表面质量适中	表面质量普通
铝合金	$20 \leqslant v_g \leqslant 60$	$10 \leqslant t \leqslant 25$	$25 \leqslant t \leqslant 40$	$40 \leqslant t \leqslant 60$
镁合金	$40 \leqslant v_g \leqslant 60$	$10 \leqslant t \leqslant 20$	$20 \leqslant t \leqslant 30$	$30 \leqslant t \leqslant 40$
锌合金	$30 \leqslant v_g \leqslant 50$	$10 \leqslant t \leqslant 20$	$20 \leqslant t \leqslant 30$	$30 \leqslant t \leqslant 40$

4. 控制最佳充模条件

有几个因素可以改变压铸机曲线及模具曲线的交点，进而改变充模时间和浇口速率。

1）浇口面积。根据式（4-6），增加浇口面积将导致模具特征曲线斜度下降，因此得到的充模时间和浇口速率也会有相应的不同。浇口面积增大将缩短充模时间，减小浇口速率。因此，尝试不同的浇口面积，会得出充模时间和浇口速率组合的不同结果，如图 4-7a 所示。

2）液压。压铸机液压的增加会导致 p_{max} 和 Q_{max} 的增加，结果使形成的压铸机曲线远离原先曲线，如图 4-7b 所示。

3）注射速度设定。柱塞推进速率可以通过快速注射速率阀来调节。改变注射速度会影响 Q_{max}，但不会影响最终的金属压力 p_{max}。Q_{max} 随注射速度的增大而增大，但通常不影响线性变化，如图 4-7c 所示。流量和注射速度的关系可以通过校准压铸机注射系统来建立。

4）柱塞尺寸。柱塞尺寸同时影响压铸机曲线中的最大金属压力 p_{max} 和最大

流量 Q_{max}。Q_{max}与柱塞大小成正比，而 p_{max}与 Q_{max}成反比。其他压铸机的设置固定了以后，柱塞尺寸越大金属熔料压力就越小，但流速却越大，如图 4-7d 所示。每台压铸机针对每个柱塞尺寸都有不同的 P-Q^2 线图。对于每个压铸机及模具组合来说，存在一个最佳柱塞尺寸，使压铸机能提供高流量和较短的充模时间，并维持足够的浇口速率，而且金属熔料压力也不会太大而产生多余飞边。

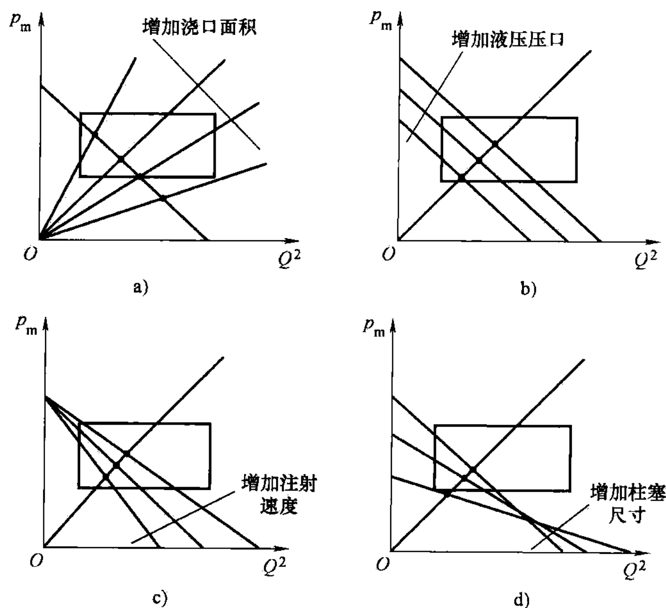


图 4-7　影响流动充模条件的因素

a）浇口面积对充模条件的效果　b）液压对充模条件的效果

c）注射速度设定对充模条件的效果　d）柱塞尺寸对充模条件的效果

只有考虑了上述因素对 P-Q^2 线图的影响，才能实现最佳的充模条件。根据每个压铸机的设置，可以尝试不同的浇口面积值来计算流量、充模时间和浇口速率，并将充模时间和浇口速率的值与边界值进行比较。如果没有得到满意的结果，可以调整压铸机设置，亦即改变柱塞尺寸值、注射速度和液压再进行计算，直到得到一个合适的充模时间和浇口速率的组合。压铸机设置和浇口面积，满足充模条件后，就可最后确定下来。这个过程好比在压铸机上进行了一系列试模。

5. 自动确定充模条件

在上述理论和原则指导下，提出了自动确定浇口面积和压铸机设置的计算机运算法则。在这项研究中，压铸机的液压是固定的。假定压铸机已经通过测试，

确定使用某柱塞，并得到了 p_{max} 和 Q_{max} 值。如果已知模具型腔的总体积 V，就可以估计最佳分流道条件了。相关参数可以采用图 4-8 所示的算法来确定，其中符号 Com（v_g，t）代表了浇口速率 v_g 和充模时间 t 的组合。

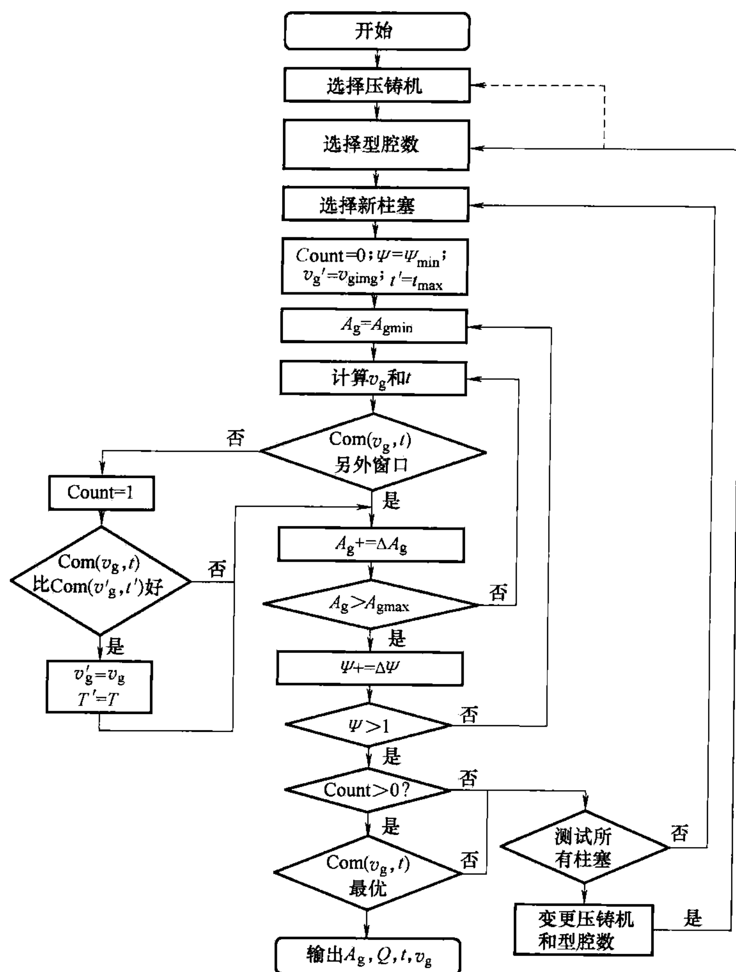


图 4-8 确定充模条件和设定压铸机的流程图

导出的结果是一组数据，包括柱塞直径、注射速度、浇口面积、充模时间、流量和浇口速率。浇口面积可以用来确定浇注系统的几何参数，而其他一些数据则用于设置压铸机。这些数据被作为属性记录在浇注系统模块，由运算需要被提取出来供计算使用。

4.4.4　浇注系统特征的设计

为了自动生成浇注系统，必须要建成一个浇注特征库。进行浇注系统设计前，必须充分定义浇注系统特性，并将其储存在库中。用户定义的浇注特征是参数模型，包括主要形状、成套的各种参量和参数及坐标原点与轴线。浇注特征库存储了浇口、溢料口、分流道及注射套/主流道等。在必要时，应用特征可以添加到库中。基于参数和特征设计的几何体都是适合标准化的。一般而言，浇注元件，尤其是注射套，都是相对复杂的几何体。但有可能将常用的浇注元件归类成不同类型的功能和几何结构。

要在考虑压铸件功能与模具设计意图的基础上确定浇注特征，以方便完成设计，修改设计。首先，必须保证在熔融金属充入模具时浇注元件能够满足所需的功能。其次，它必须保证当参数修改后参量模型会按预期改变。由 Hoffmann 和 Arinyo[17]，以及 Chen 和 Wei[18]提出的方法，已经被运用到 Pro/E 的 CAD 系统中。与 Pro/E 不同，UG 允许在一个零件里存有多个可分离的实体，其形状和位置不一定要确定在现有几何体上。浇注特征可以通过以下五个步骤来创建。

1. 创建实体

不同浇注元件的几何体有不同的复杂程度，因此创建实体模型要用各种方法。比如浇口流道、连接浇口和分流道、通过减小截面积来增加压力的小段流道等，有一个比较复杂的形状，通常与浇口共同创建。Street[19]用 5 个相交的剖面代表浇口流道的不同区域，其中第一个剖面 S_0 和第五个剖面 S_4，分别是浇口引入段和流道的断面。图 4-9a 表示了创建扇形浇口流道的浇口实体模型的过程。首先，要设置三个基本数据平面 DP_{xy}、DP_{yz}和 DP_{zx}，并在 DP_{zx}内草绘 S_0。其次，再从 DP_{zx}偏置出来的 4 个等距平面 DP_{zx1}、DP_{zx2}、DP_{zx3}和 DP_{zx4}中分别草绘剖面 S_1、S_2、S_3 和 S_4。最后，通过理论模线的放样操作，将所有轮廓形成实体，如图 4-9c 所示。

2. 定义约束

空间约束，如平行、点在线上、偏置等，在创建数据平面和草绘断面/剖面时都要用到。用定义尺寸约束来捕捉几何尺寸及工程变量间的数学关系。在浇口中的通道模型中，从 S_4 到 S_0 间长度方向截面积和深度都呈线性下降，因此 5 个断面剖面间的约束等式定义如下：

$$\left.\begin{aligned}
&D_g = A_g/W'_g;\ D_r = A_r/W'_r;\\
&D_1 = D_g + 1/4(D_r - D_g);\ W'_1 = A_g + 1/4(A_r - A_g)/D_1;\\
&D_2 = D_g + 1/2(D_r - D_g);\ W'_2 = A_g + 1/4(A_r - A_g)/D_2;\\
&D_3 = D_g + 3/4(D_r - D_g);\ W'_3 = A_g + 3/4(A_r - A_g)/D_3;\\
&D_r > D_g;\ A_r > A_g
\end{aligned}\right\}\tag{4-9}$$

其中，A、W'和D分别代表断面面积、平均宽度和深度。下标g和r代表浇口和与它连接的流道。

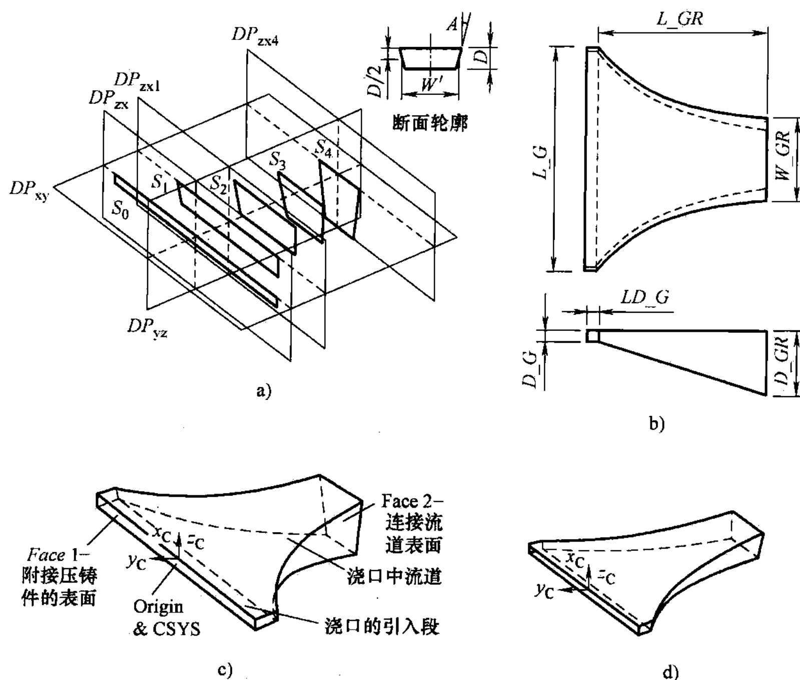


图 4-9 浇注特征的创建过程[2]

a）实体模型的创建 b）尺寸变量的定义

c）原始参量模型 d）改变尺寸后的模型变化

3. 定义尺寸变量

用户定义的浇注特征代入参数指定为可变尺寸参数。通常这些尺寸参数对一个浇注元件有重要的意义。例如，对图 4-9b 所示的浇口引入段，浇口长度*L_ G*、浇口深度*D_ G*、浇口逢槽长*LD_ G*、浇口流道长度*L_ GR*、浇口流道深度*D_ GR*和浇口流道宽度*W_ GR*，必须具有最佳值以满足充模条件。用户通过界面输入参数给所需的浇注元件特征确定可变参数的值。这些数值都会以表达式的形式记录在生成的浇注系统模块中。当用户在外部修改了参数，新的值就传递给表达式，浇注元件的形状则会随新的数值而改变，如图 4-9d 所示。

4. 原点和直角坐标系的确定

每个浇注特征都有各自的原点和直角坐标系（CSYS），以方便将特征附在零件上。从库中重新得到的特征是将特征的原点和 CSYS 与零件中导出的指定点及其 CSYS 匹配后附上的。在几何体旋转或转化时，浇注特征的原点和 CSYS 也随

之变换。

5. 属性的定义

特征数据可以记录为属性。浇注特征根据各自的功能被分为浇口、分流道、溢流槽和主流道等各个组。每个组由不同类型和子类型的特征组成。因此，文本的属性，包括名称、种类、类型、子类型和系列号等，经赋值来建立惟一特征。拓扑属性是给边界面赋值的，以确定哪些对象必须相连。如表面1和表面2必须分别连接到一个零件和分流道，如图4-9c所示。此外，特征的位置和方向的信息也必须记录下来，以防特征从CAD系统输入后丢失。

图4-10所示为一些设计系统库中存储的浇注特征。其中，图4-10a、图4-10b和图4-10c是扇形浇口特征，图4-10d是切向浇口特征，图4-10e是由两个切向浇口合成的浇口特征，图4-10f和图4-10g是溢流槽特征，图4-10h和图4-10i是分别是冷腔室压铸机中两腔和四腔模具的流道模板特征。

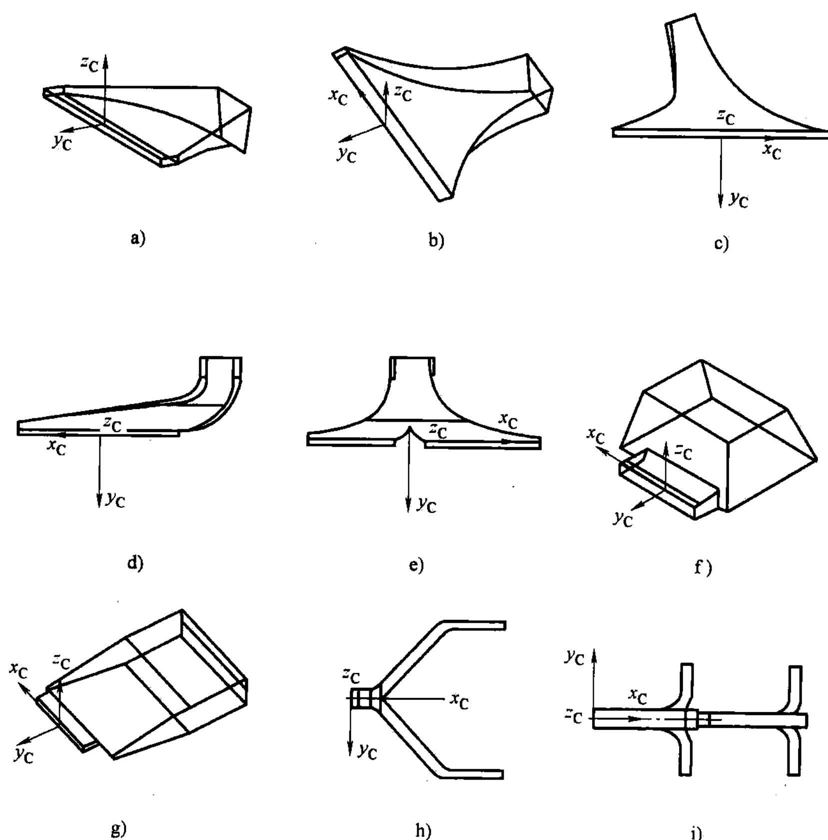


图4-10 浇注特征[2]

4.4.5 压铸件上浇口几何体的放置

在使用了上述算法确定浇口面积值之后，就得确定熔融金属经浇口流入型腔的方式了。压铸件的形状各式各样，Herman[14]列出了一些相似压铸件的普通形状，包括一般平板、开放式框、扁平圆盘、浅盒、深盒和管状等，每个都代表了一个特殊的金属流动模式，需要某个进料方式。考虑熔融金属的流动，流道布置可参照以下原则进行。

1）使金属熔料朝型腔中最小尺寸的方向流动。

2）使所有分流道互相平行或分叉。

3）使模具的各型腔内所有的部分，有相同的充填距离。

流动方式取决于压铸件几何体的复杂程度。不同的浇口流道将熔融金属引向浇口能得到所需的流动方式。浇口流道在流道和浇口引入段之间形成了一个过渡区。有两种最常用的浇口流道，分别是扇形浇口流道和切向浇口流道。选择浇口流道形式，要遵循以下一些原则。

1）如果压铸件的某部分是梯形或正方形的，就用扇形浇口流道。

2）如果压铸件的某部分是平行四边形或矩形的，就用切向浇口流道。

3）如果压铸件形状复杂，就用混合型的浇口流道。

例如，图4-11所示的压铸件形状大致是正方形，所以应采用扇形浇口流道进行合理填充；图4-12所示的手机壳是镁合金压铸件，形状类似矩形，最好采用切向浇口流道。

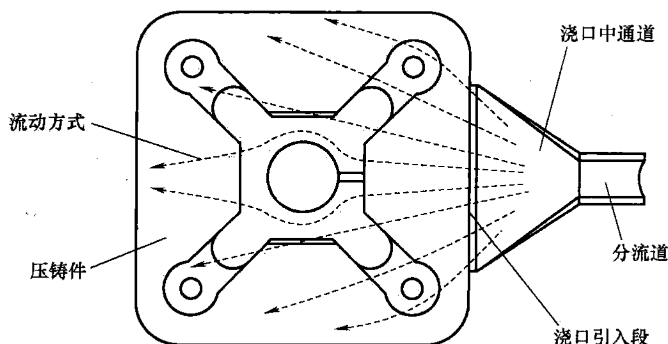


图4-11 简单的扇形浇口流道和压铸件中的流动方式

4.4.6 注射套、主流道套和推料筒设计

在冷腔室压铸时，压铸机的柱塞通过注射套把金属熔料推入模具。由注射套和柱塞形成的孔腔也成为了浇注系统的一部分。金属完全凝固后，会在注射套的

锥形底形成一个干饼。在模具行业里，标准注射套可以购买。

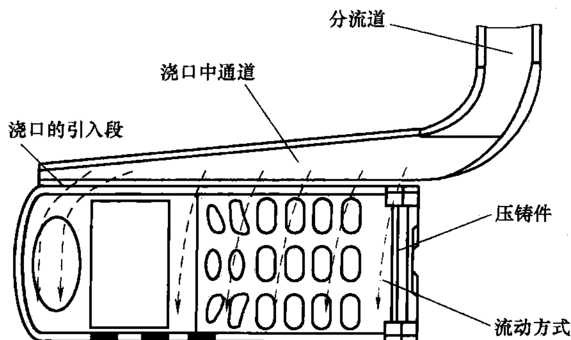


图4-12　简单的切向浇口流道和压铸件中的流动方式

热腔室压铸中的熔融金属输送系统，允许使用主流道套替代注射套。通常是主流道套和推料筒一起使用，使金属熔料顺利充入模具。主流道套和推料筒中流道形成了浇注系统的一部分。压铸行业里，标准尺寸的主流道套和推料筒也可以买到。

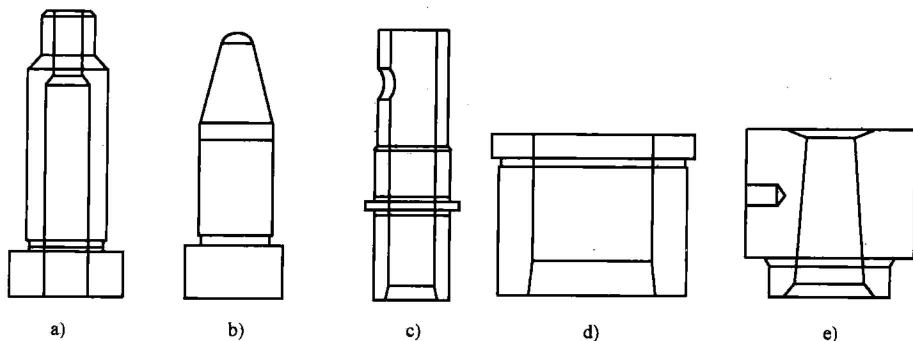


图4-13　标准件的参量化模型

a）平头推料筒　b）锥形头推料筒　c）综合式注射套

d）联合式注射套　e）主流道套

在这项研究中，注射套、主流道套和推料筒都视为标准件。为了便于设计这些标准件，不同系列的参量模型都是根据参考文献［20］中的数据来创建的。其中一些标准件如图4-13所示。可通过用户界面示例，将标准件配置到模具中。各种类型和尺寸系列都可供挑选。选择注射套时，选定的孔径必须等于柱塞的外径；长度尺寸必须符合模板的厚度。选择主流道套和推料筒时，必须使金属熔流动中最受制约的截面积，大于或等于主流道引出处的分流道总截面。

4.5 模架设计

4.5.1 模架

模架是压铸模中最关键的部件。在模架的结构框架上，包含所有加工和安装的零部件，如模具镶块、冷却系统、顶出系统及斜导柱滑块机构等。标准模架一般采用单分型的两板模，这是行业中使用最广泛的结构。以下各节将介绍计算机自动生成模架的设计系统的应用。

4.5.2 模架结构和变量

一个典型的两模板模架主要由两块板（一块型腔板和一块型芯板），另加顶端夹具、顶杆支撑板、顶板、底端夹具、导柱、导套及螺钉等组成。图 4-14 所示为一个典型两模板模架及其尺寸变量（不含导柱、导套和螺钉）。

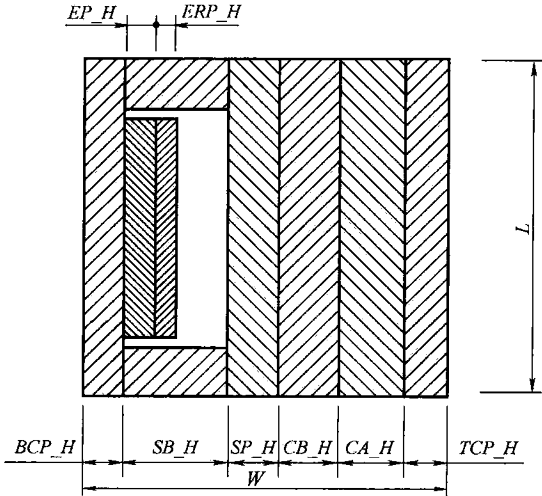


图 4-14 典型的两模板模架及其尺寸变量

模架基本上有三个尺寸：长度、宽度和整体的高度。因为不同的压铸模具有各种各样的型腔，但它们的顶出结构、零件的大小，即顶板、顶杆支撑板和顶杆等之间结构等都相似。它们在压铸零件中的形状是相对独立的，取决于模架的总体尺寸。参考图 4-14，一个典型的两模板模具的尺寸变量可归纳如表 4-3 所示，其中间变量主要取决于直接变量。

表 4-3 典型的两模板模架的尺寸变量

变量符号	变量含义	备　注	变量符号	变量含义	备　注
L	模架长度	主要直接变量	*SP_H*	支撑板高度	非直接变量
W	模架宽度	主要直接变量	*BCP_H*	底夹板高度	非直接变量
CA_H	型腔板 A 高度	主要直接变量	*ERP_H*	顶杆固定板高度	非直接变量
CB_H	型芯板 B 高度	主要直接变量	*EP_H*	顶板高度	非直接变量
TCP_H	顶夹板高度	非直接变量	*SB_H*	垫块高度	非直接变量

4.5.3 参量化模架的装配模型创建

要使模架设计自动化，模架参量化装配模型，包括所有的模板、导柱、导套和螺钉等应被预先建模并储存在库中。模架装配模型可分为两个组件：型腔半模

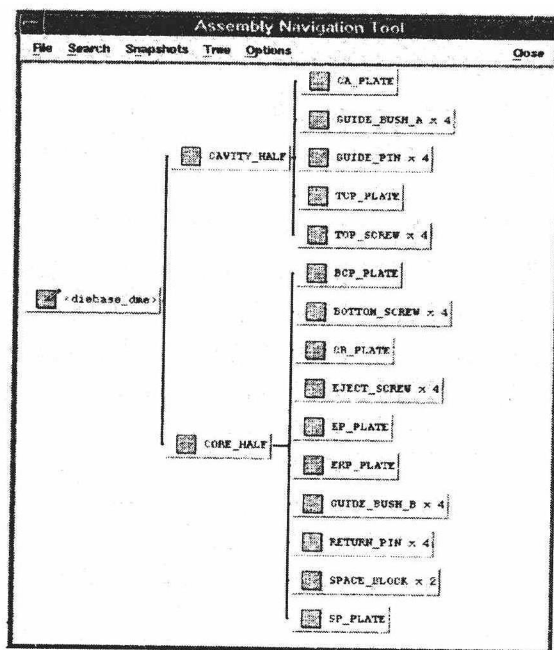


图4-15 模架的装配结构

和型芯半模。前者包括顶夹板和型腔板A，后者包括型芯板B、支撑板和顶板等。模架的装配结构和整体装配，分别如图4-15和图4-16所示。

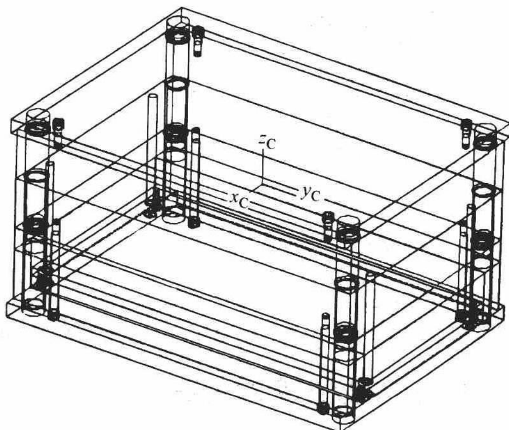


图4-16 模架的整体装配

在模架装配中，所有的零部件之间都有联系。这些联系都是通过配合约束和尺寸约束来描述的。配合约束是装配中两个不同零部件上两个几何体之间的配合关系。两个几何体之间的配合关系有3种[21]。

1）重合（一表面到另个表面）。两个相同种类的零件在相配位置上重合，两个零件的平面之间允许有一段偏置距离。

2）并排（表面之间或轴之间）。平面零件在约束位置上使两个零件的平面结合并紧贴，两个平面之间允许有一段偏置距离。调准轴对称零件的轴线，使其同轴或平行。

3）定向（校准角度）。两个零件之间的定向位置，用转动它们角度来确定，并允许不同几何体的表面和棱边之间的配合。

装配中零件在定位时这些约束类型要结合使用。通常，2～3个配合约束就可确定一个零件的位置和方向。例如，定位长方形体通常要连续用三个配合约束：配合(面)=>校正(面)=>校准(面)；定位圆柱用两个约束：配合(面)=>校准(轴)就可以定位了。

为了保持各零部件在装配中的尺寸关联，模架中的各个尺寸约束是以表达式定义在装配中的父结点。每个子结点的尺寸变量是连在那些顶层结点上的。如图4-17所示，子结点 ca_ plate 和 top_ screw 的变量连接在父结点 diebase_ dme 上，标记为“::”。在设计过程中，输入值单独交给父结点，此关联会刷新父结点相连的所有表达式。当父结点的值改变了，则子结点的值也会改变。

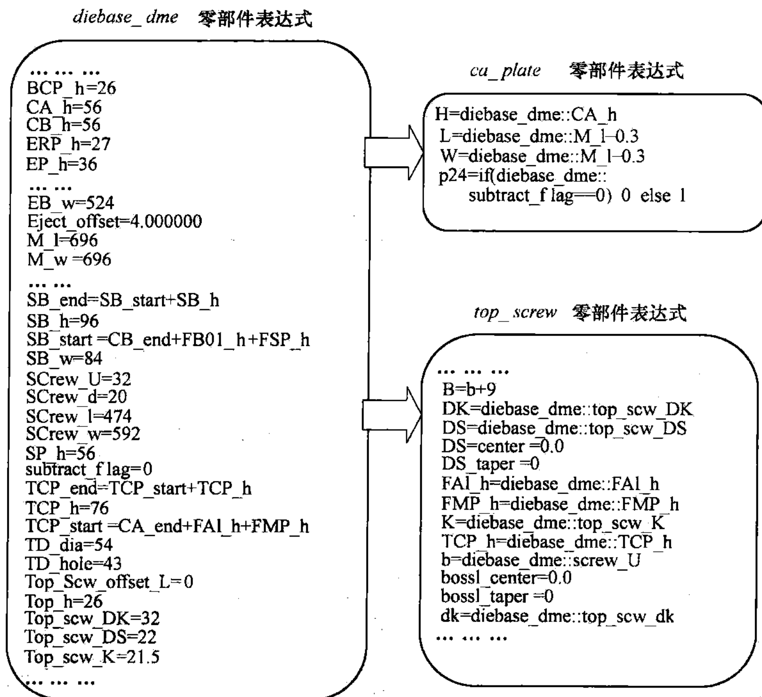


图4-17 各零部件之间的尺寸参数关联

4.5.4 模架数据库的创建

由于标准模架可以购买，模架的设计就变得更为容易。D-M-E公司就是这些

制造企业之一，它供应各种标准模架[14]。其B系列的模架尺寸从156mm×156mm至596mm×896mm不等，板厚也有许多不同的规格[22]。建立数据库要把模架目录中所有信息都包含进去，主要包括尺寸列表、板厚、空间参数及螺钉、导柱和导套尺寸等。当选择了某一类型和尺寸的模架之后，数据库中相应的记录就以示例的形式被提取并传递给参量化装配模型。

4.5.5　模架的自动生成

为方便模架设计，界面让用户选择类型、主要尺寸及其他相关数据。模架的参量化装配模型，可在数据库及浏览目录中从相关的实例参量中调出。模架将以下列方法定位和定向：

1）将型腔板和型芯板相配合面与可能的分型表面相配。

2）校准 Z+正半轴到模具开模方向。

3）校准模架中心点到型腔布局中心点。

将参量化的装配变成整个模具装配过程的实例，如图4-4所示。

4.6　型芯和型腔的生成

与注射模类似，型芯和型腔的生成是压铸模设计中非常重要的步骤。由于模具的设计工具是独立于几何体的，所以先进的模具设计方法可以使用任何模具设计系统，如IMOLD™等就提供有模具创建型芯和型腔的功能。利用这工具，型芯和型腔可用以下方法创建。

1）以几何实体的减差操作修补零件表面上通孔。

2）创建分型线然后生成分型表面。

3）用压铸件模型裁减包含盒体。

4）使用引出的分型表面和修补表面，将包含盒体分离成两部分。

4.7　模具零件的自动裁减

参量化模架中的模板是空白实体块，板上还没有形成孔或型腔。相应的孔和型腔应在浇注系统、顶出系统、型腔镶块等设计好后再创建。由模板裁减相关零件及特征来完成。

裁减操作是把对象的体积从另一个对象中减除。例如，为了在模板上打一个孔，先要建个所需孔的形状，并以此作为修改对象（工具对象）与原对象（目标对象）进行布尔减差操作。P 和 Q 分别代表目标对象和工具对象，减差操作可用式（4-10）来表示[23]。

$$P - Q = P \cap \overline{Q} \tag{4-10}$$

其中，$\overline{Q} = \{X: X \notin Q\}$，亦即 Q 的补集。在减差操作中，模板，如型腔板和型芯板等通常作为目标对象，而套筒、注射套、主流道套、浇注特征、顶杆等作为工具对象。

但在实际操作中，其中一个零件要插入的孔，却与零件的外部边界不完全相同。例如，有模板和注射套的零件装配，注射套是要装配进模板上的孔板。注射套的几何形状如图 4-18a 所示，它不接受直接将注射套对模板作减差运算，主要基于以下原因。

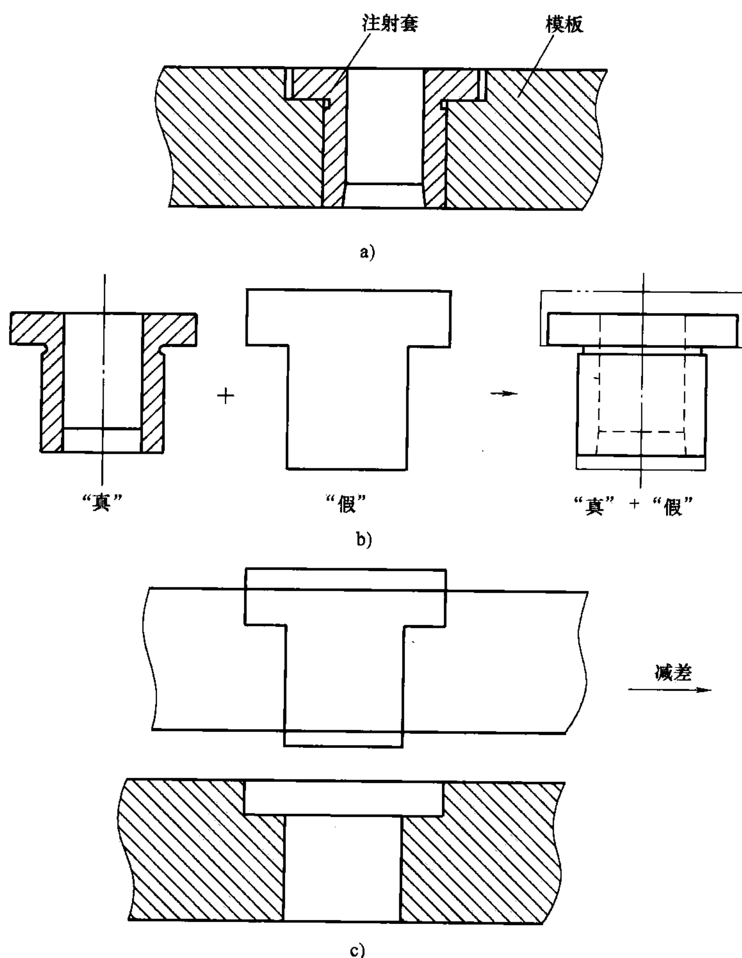


图 4-18 用注射套裁减模板的过程

a）模板和注射套的装配 b）组合内的两个参考设置 c）用“假”对象设置减差

1）紧贴台阶的凹槽在孔上产生一圈凸起，可能会阻挠注射套的插入和拔出。

2）注射套中的孔可能会阻碍两个对象适当减差。

3）使孔的上部比注射套头部大些是合理的。

为了解决这个问题，就要创建反映该孔形状的实体对象，并使其与注射套的原始模型相连。这个附属对象作为减差操作的参考对象。为了区分两个对象，原对象和附属对象分别定名“真”和“假”实体，如图4-18b所示。在减差操作中，选择一个零件为工具对象，该系统将自动确定“假”实体对象，并用它来正确地减去目标对象。图4-18表示了模板被注射套的“假”实体减去的过程。

4.8 系统的执行和实例

前面几节叙述的概念和方法，已经贯彻到压铸模具的特征参量化计算机辅助设计系统DieWizard[13]中。在本节，将先介绍系统的开发平台、系统体系和各种功能模块，然后用两实例来说明其应用和原型系统。

4.8.1 开发平台和语言

上述模具设计系统是在UG平台下，在HP-UX环境中用C语言开发的。而且，UG/Open API允许建立用户化系统，它也支持用户自定义特征的设计。这都要归功于它的参量化性质和从特征中提取设计信息的能力。UG平台提供了用户功能UFUN作为一个软件工具，能够在UG平台和开发习惯之间实现简易的结合。与UG相似，Pro/E或SolidWorks系统，从软件开发角度来说，都有以下优点。

1）API含有大量的用户调用功能，能访问图形终端子程序、文件管理和CAD模块数据库。它们为CAD平台和“附加”应用开发者，提供了方便友好的界面。

2）提供了多样的二维草绘工具和一些基本形式特征，可以根据不同应用的具体需求用来构建更复杂的用户自定义的功能。

3）以属性的形式为用户提供了记录和提取某类信息的常规方法。属性可以分配到零件和几何体上，包括实体、面和边等。而且这些信息可以在必要时通过子程序/功能来提取。

4）它们还拥有友好的用户界面建立方法，开发者可以设计菜单供最终用户与系统进行通信沟通。

5）用户功能使其很容易从高级语言，如C/C++中形成可靠核心的界面，而

且其用户功能可以在内部和外部环境中运行。

压铸模和注射模设计中系统开发平台的详细情况将在第9章作进一步介绍。

4.8.2 系统结构——模具向导

模具设计向导系统的结构如图4-19所示。数据库、浇口特征库及模架库置于CAD平台。每个模块的子菜单有含一组方法和程序，执行一些具体的功能。

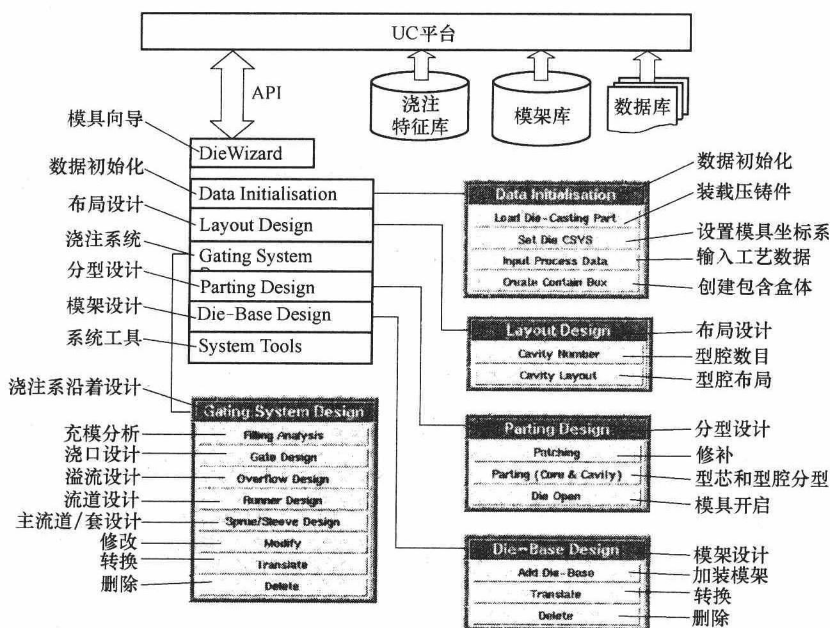


图4-19 模具向导的结构

1. 数据初始化模块

该模块提供给用户一些功能，如载入压铸件、输入过程数据、明确开模方向、创建包含盒体等。

“装载压铸件”选项，让用户能通过载入压铸件三维模型，创建新模具设计工程。用户也可以装载完成了部分的项目或者修改已有模具，来继续完成整体装配。这个“设置模具坐标系”的选项，让用户指定模具开模的方向。该系统默

认 $Z+$ 正半轴为模具开模方向。“输入工艺数据”选项，让用户输入工艺数据，包括材料的工艺性能、压铸件的特征和压铸机参量。收缩余量被赋值，压铸件用“应用收缩率”按钮来确定收缩比率，如图 4-20 所示。型腔镶块的包含盒体用“包含盒体”按钮创建。

2. 型腔布局模块

这个模块提供了计算型腔数的方法。将先输入布局数据，通过用户的选择自动地安排型腔分布。图 4-21 所示为选择布局模式和确定空间参量的界面。



图 4-20　数据输入对话框

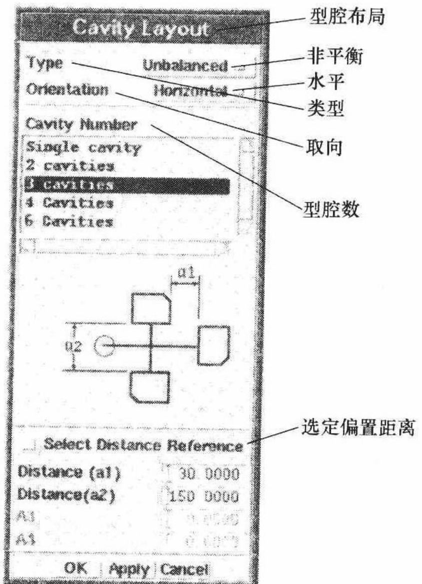


图 4-21　型腔布局界面

3. 浇注系统设计模块

设计浇注系统前，用户需要用“充模分析”按钮来分析充模条件，如图 4-22 所示。根据分析结果，用户可以使用相关选项来设计浇口、溢流槽、分流道及浇道/套筒等。用户需要一个界面来从库中提取出浇注特点，并把它们添加到

浇注部件上。图4-23所示为UG为用户设计的溢流槽设计界面。用户可以选择特征的类型和子类型，选择定位选项并输入相关数据。界面会显示选定类型的特征模板，使用户能够目视确定尺寸变量。

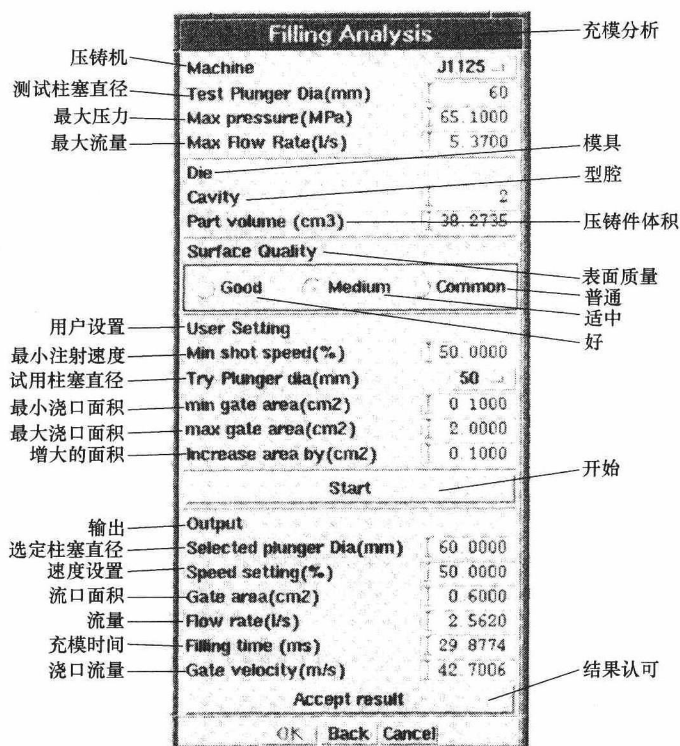


图4-22 充模分析界面

浇口、流道和主流道/套的设计界面，分别如图4-24、图4-25和图4-26所示。流道和套的尺寸取决于模板的厚度，通常在模架设计完成后再进行设计。

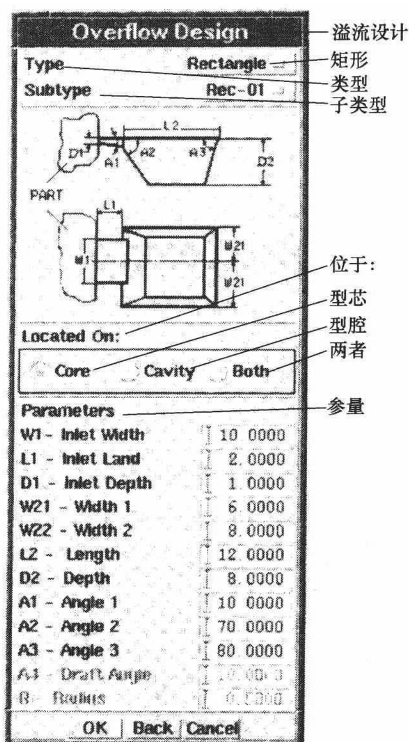


图 4-23 溢流槽设计界面

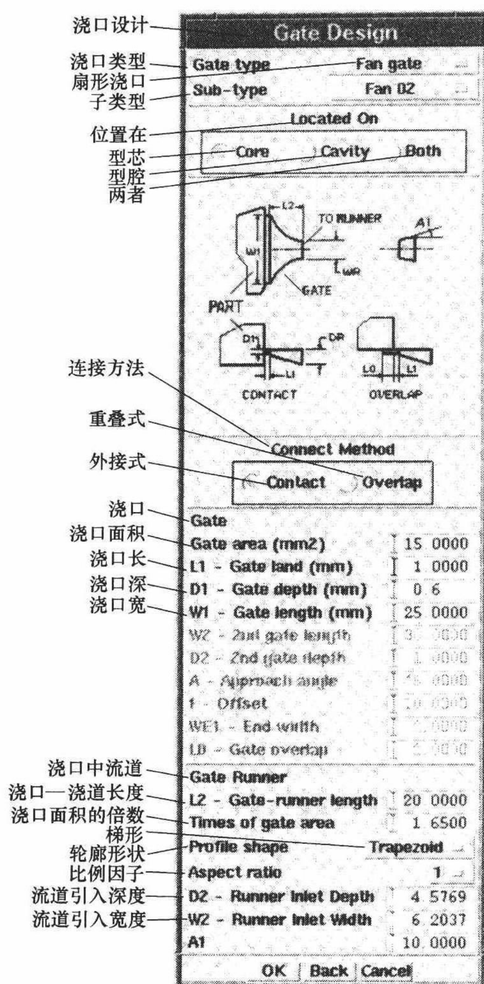


图 4-24 浇口设计界面

4. 模架设计模块

模架可在分型完成前、后进行设计。图 4-27 所示为模架设计界面。使用这个对话框，用户可以指定所用模架的类型和子类型，选择模架的主要尺寸和各模板的厚度。使用零件设计对话框，用户可以进一步调整各模板的尺寸，修改螺钉、导柱和导套的空间参数。

5. 分型模块

这个模块提供了修补和分型的工具。用“修补”选项，将通孔修补了以后，用户就可使用“分型”选项来选择分型线了。然后系统会自动生成压铸件所需的型芯和型腔。“开模”选项可用来模拟模具的开、闭过程。

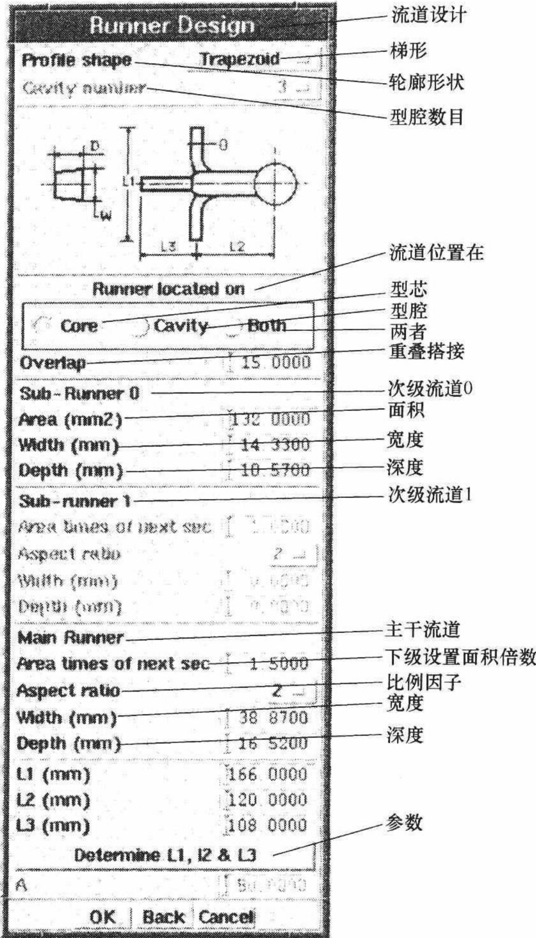


图 4-25 流道设计界面

6. 系统工具模块

这个模块提供了在模板中减去相关型腔并在型腔镶块中减去孔的工具。当选择了减差功能，用户就会被提示分别选择目标对象和工具对象，然后系统会自动用工具实体减去目标实体。

4.8.3 实例

1. 实例 1

这个实例用简单的压铸件来显示浇口、布局和模架设计的整个过程。首先，载入盖板实样的三维模型，输入必要的工艺数据，应用收缩率折算，如图 4-28 所示。在这个实例中使用的压铸机是一台冷腔室压铸机 J1125。其夹紧力 250t，

模具最大允许尺寸为580mm×580mm。压铸机最大金属熔料压力为65.1MPa，选用直径为60mm的柱塞时，最大流率为53.7l/s[20]。

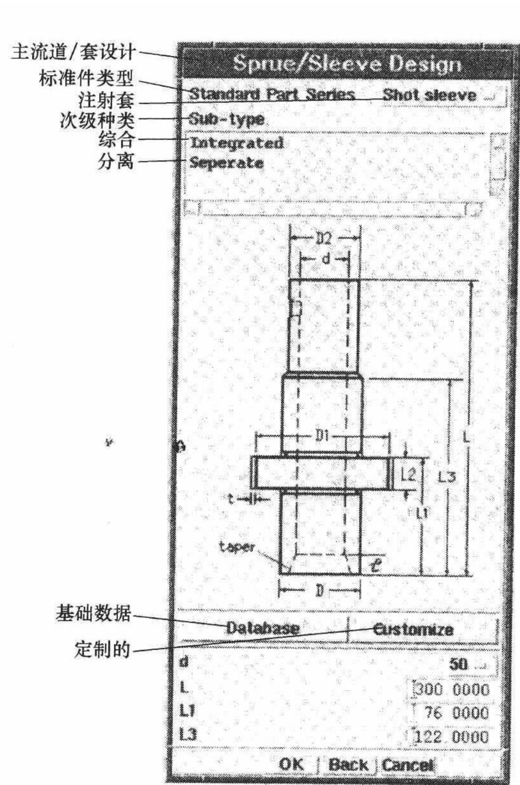


图4-26 主流道/套设计的界面

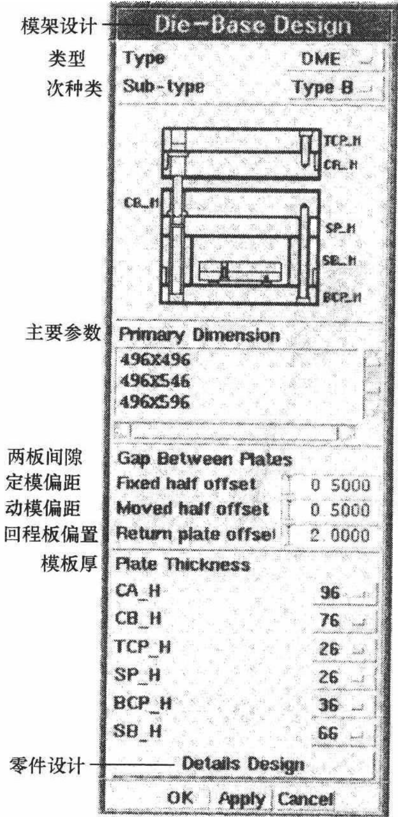


图4-27 模架设计界面

盖板的形状类似对称的梯形。充型时熔融金属开始从一边流入，扩展到中间后在另一边结束流动。因此，要用一个扇形浇口来浇注熔融金属。因为整个零件可以视为片材，所以还要设计一个溢流槽来吸收料流末端的空气和杂质。

在考虑了压铸机的尺寸及注射、夹紧力限制以后，选用四型腔模具。在型腔镶块间的间距设定后，四型腔布局方式和各型腔被载入模具的预先安排，如图4-29所示。

接下来启动充填分析模块，计算所需的浇口面积、充模时间和浇口流速，如图4-30所示。结果表明，用直径为50mm的柱塞充模时，柱塞推进和浇口速率分别达到31.35m/s和39.32m/s；注射速率设定为65%，浇口总面积达0.60cm²。选择这组数据作为特定的压铸机和模具组合，然后作为属性被记录在零件文件中。



图 4-28 三维压铸件模型和相关工艺数据

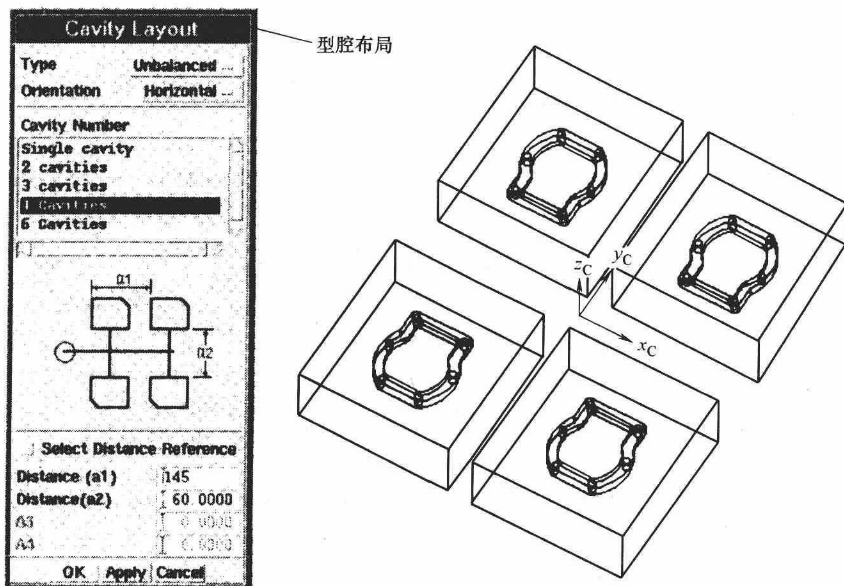


图 4-29 创建四型腔模式的布局

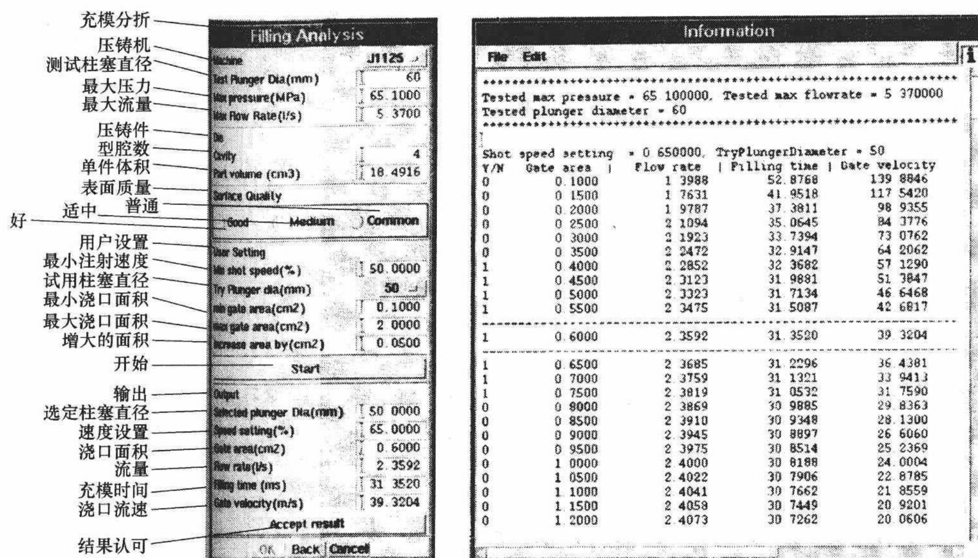


图 4-30　充模分析与结果的生成界面

下一步是设计浇注元件。每个型腔有一个浇口，四个浇口同时创建。由于每个浇口的截面积为 15.0mm²，尺寸参量可以确定。浇口几何体由浇口特征生成，如图 4-31 所示。之后选择适合型腔布局方式的流道特征，见图 4-32。因为沿流动路径从流道进口到浇口有面积减缩，每个流道段的截面积取决于下段的总面积，所以用户只需指定每段的面积因子、断面轮廓类型和长径比，系统将会计算

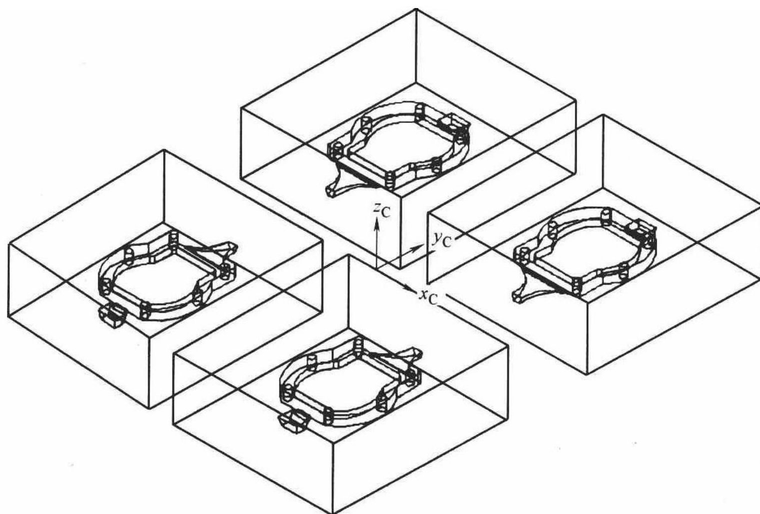


图 4-31　浇口和溢流槽的设计

主流道和分流道的全部尺寸参数，随后自动生成分流道几何体，并将其附给浇注元件。四型腔模具选择大小为 446mm × 546mm 的模架，如图 4-33 所示。最后设计注射套。整个模具装配图，如图 4-34 所示。

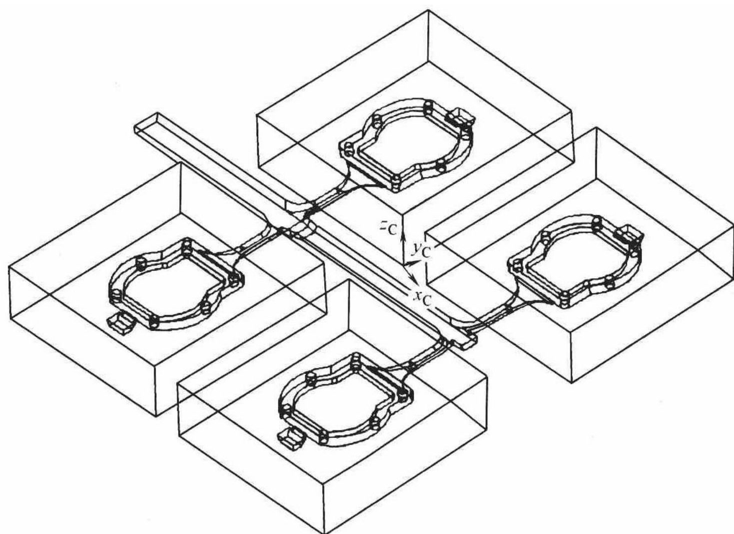


图 4-32 分流道设计

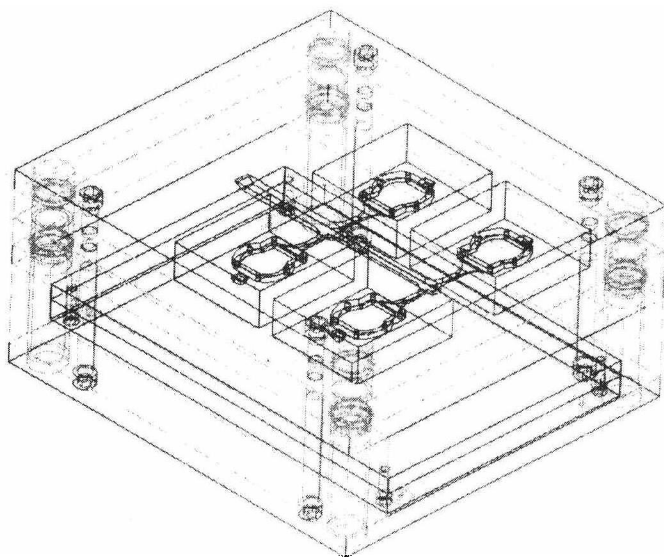


图 4-33 模架设计

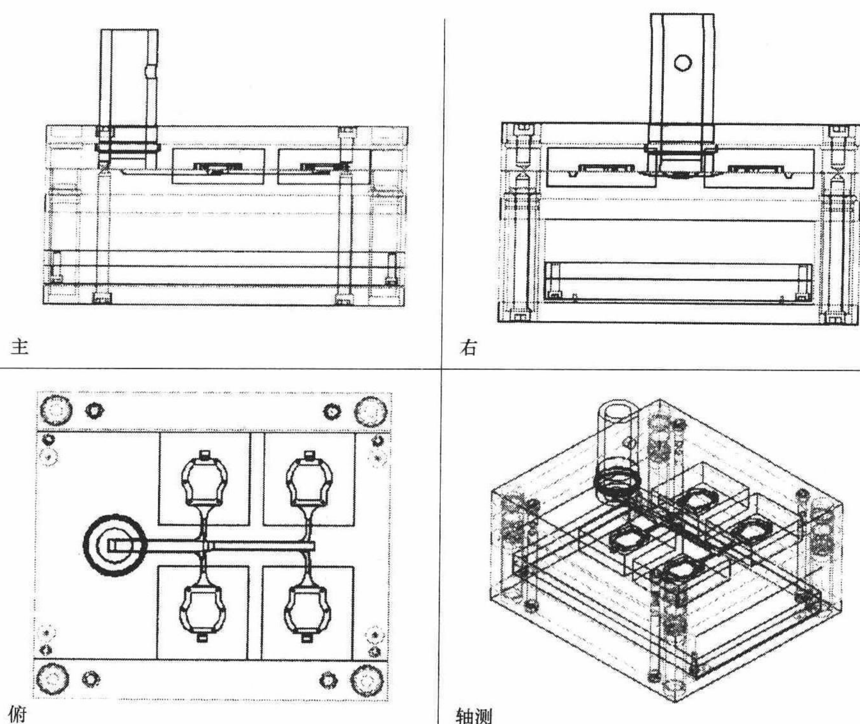


图4-34　压铸模的装配设计实例1

2. 实例2

本实例研究较为复杂的支撑硬板压铸件，着重讨论复杂压铸件如何选择合适的浇注元件，如何创建型芯和型腔，以及如何裁减不同模板和组件以形成相关凹槽、孔和流道。

实例中使用的是冷腔室压铸机J1140。其夹紧力400t，模具最大允许尺寸为760mm×660mm。支撑硬板的三维模型，如图4-35所示。此压铸件采用三型腔分布形式，如图4-36所示。

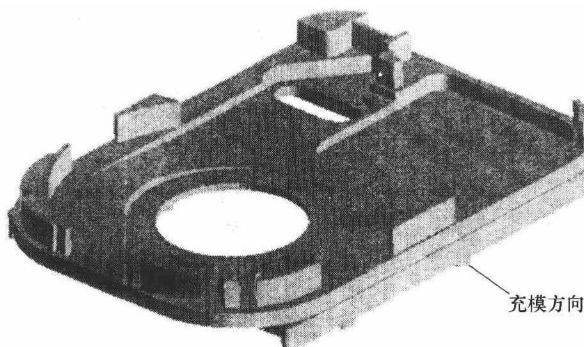


图4-35　支承硬板三维造型

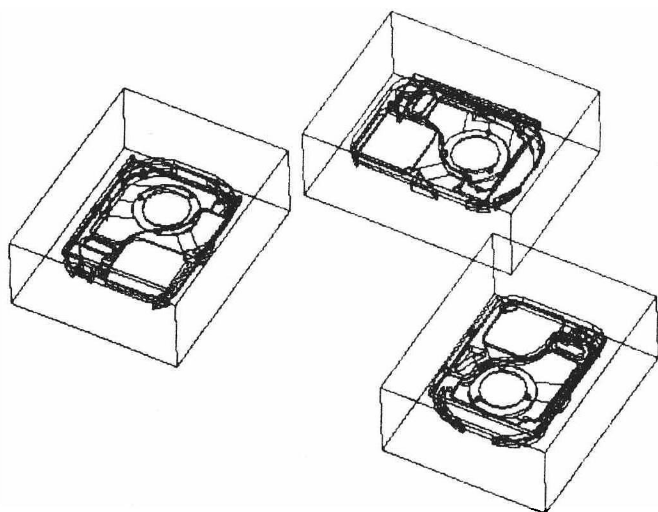


图 4-36 三型腔布局

由于压铸件中间的大孔会使金属熔料分流成两股，因此要创建两条流道。熔融金属会从一侧进入后，分为两条流道，再在另一侧汇合，如图 4-37 所示。所以本实例用复合切向双浇口，两个子浇口的面积是与各自浇注的两个部分的体积成正比的。料流末端要设置两个溢流槽来吸收空气和杂质。分析充模条件，得出有关参数后再创建浇口和溢流槽。之后根据布局方式设计分流道。在本实例中，溢流槽和浇口设在定模部分，而流道放在动模部分，浇口和分流道通过相隔一段距离相互重叠搭接，如图 4-38 所示。最后设计模架，添加注射套。整个模具装配，如图 4-39 所示。

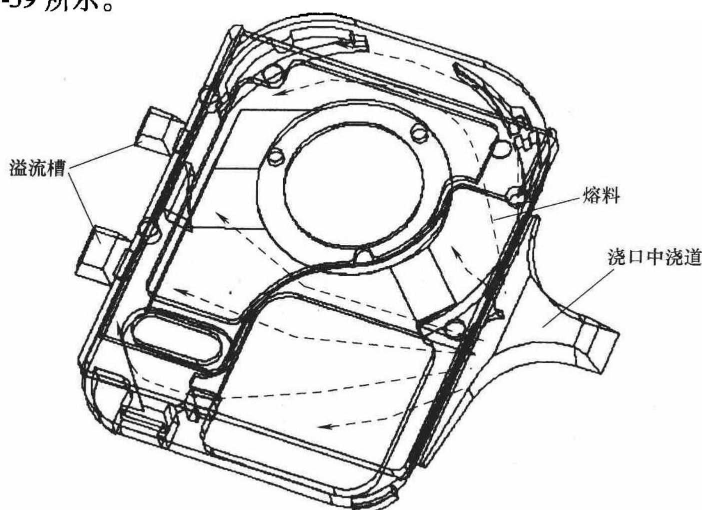


图 4-37 浇口和溢流槽设计

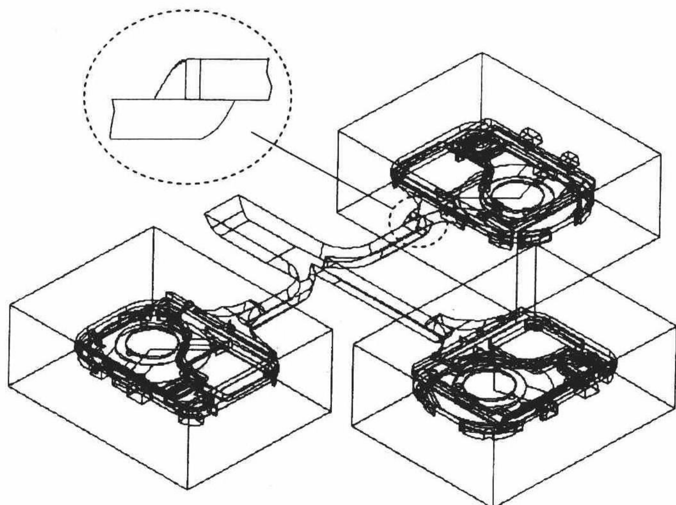


图4-38 整个浇注系统

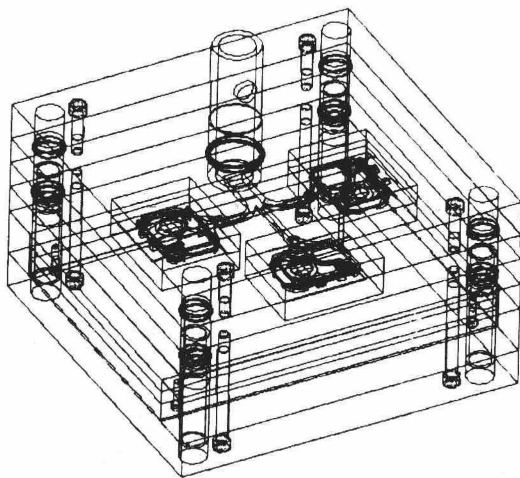


图4-39 模具装配实例2

现用分型模块来创建型芯和型腔。首先，压铸件上的两个孔需要修复。然后手动或自动设置分型线和分型方向，生成分型面。最后，经分型表面将包含盒体

分成两半，在两个半模中自动形成压铸件形状的型腔凹槽。两个半模必须进一步裁减出设计的浇注系统。然后，完整地生成型芯和型腔镶块，如图 4-40 所示。

下一步就是裁减模板创建相关凹槽、孔和流道了。图 4-41 和 4-42 所示为裁减后的型芯板和型腔板。

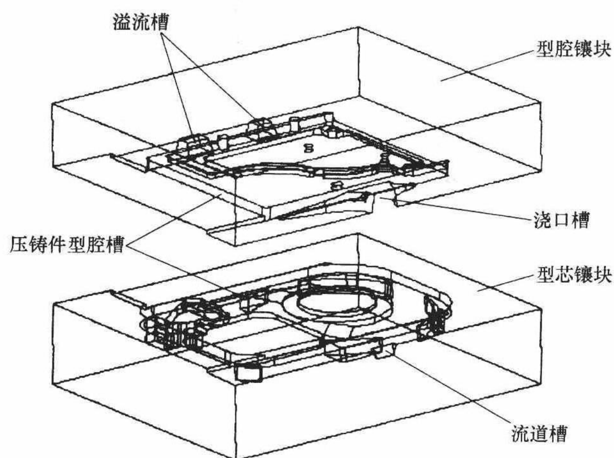


图 4-40 型芯和型腔镶块

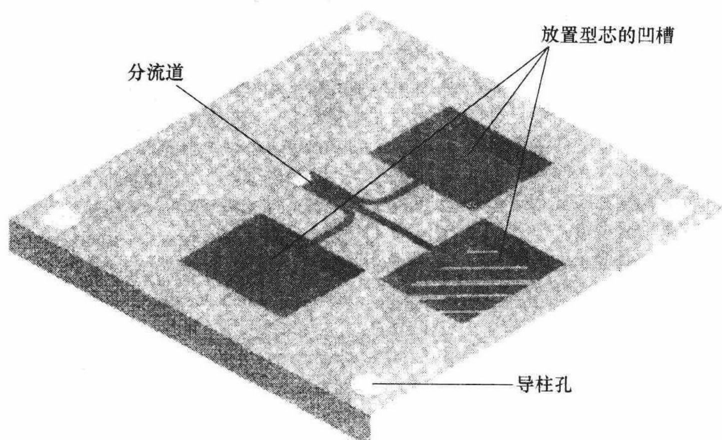


图 4-41 型芯板

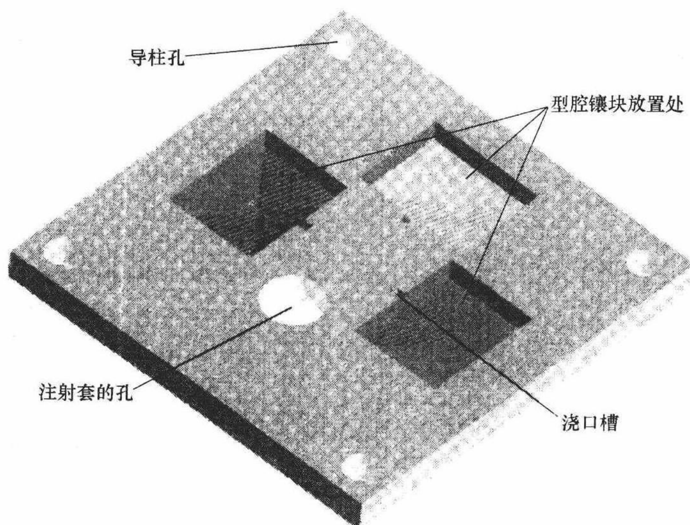


图4-42　型腔板

4.9　综述

本章概括了压铸模具计算机辅助设计方法的研发过程。压铸模具的设计过程包括型腔布局、浇注系统、模架、分型、顶出系统和冷却系统等的设计。研究成果及其报道的原创系统，促使浇注系统、型腔布局、分型、模架等自动化生成。为实现这个目标，引入了参量及特征设计范例来开发压铸模具设计系统。浇注系统、模架、模板布局的参量化模型，都事先创建并储存在库中。相关参数和位参量确定后，可从库中自动提取，并给出模具装配实例。采用基于 $P\text{-}Q^2$ 技术的算法，进行充模分析和估计工艺参量，由估计结果决定浇注系统的尺寸参数。基于这些理念和方法的原型设计系统 DieWizard，利用并开发了商业化的 CAD 平台。该系统能半自动地设计型腔、浇注系统和模架等，从而大大缩短了设计所需的时间。该方法和原理也可用于其他 CAD/CAM 系统，得到类似的应用和实施。

参考文献

[1] NADCA, North American Die Casting Association, http://www.diecasting.org, 2001.
[2] J.Y.H. Fuh, S.H. Wu and K.S. Lee, Development of Semi-Automated Die Casting Die Design System", Proc. of Inst. of Mech Engr, Part B.: J of Engr Mfg, Vol. 216, No. V12, pp. 1575-1588, 2003.
[3] S.H. Wu, Development of Feature-based Parametric Design System for Die Casting Die, MEng thesis, National University of Singapore, 2001.

[4] Unigraphics, UG Solutions, http://www.ugsolutions.com, 2002.
[5] Pro/Engineer, PTC Corporation, http://www.ptc.com, 2002.
[6] SolidWorks 2002, Solid Works Corporation, http://www.solidworks.com, 2002.
[7] IMOLD, ManuSoft Technology Pte. Ltd., http://www.manusoftcorp.com, Singapore, 2002.
[8] M.E. Mehalawi, and R.A. Miller, "Towards computer-assisted configuration of die casting dies", Die-Casting Engineer, January/February, 2000, pp.41-46.
[9] CASTFLOW™ and CASTHERM™ Software, Castec Australia Pty. Ltd., 2000.
[10] MAGMA Software, Germany, http://www.magmasoft.com/, 2001.
[11] R.K. Irani, B.H. Kim, and J.R. Dixon, "Towards automated design of the feed system of injection molds by integrating CAE, iterative redesign and features", Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME, Vol.117, No.1, pp.72-77, 1995.
[12] B.H. Lee and B.H. Kim, "Automated design for the runner system of injection molds based on packing simulation", Processing Annual Technical Conference–ANTEC, Conference Proceedings, Indianapolis, Indiana, Vol.1, 1996, pp.708-713.
[13] J.S. Tu, R.K. Foran, A.M. Hines, and P.R. Aimone, "Integrated procedure for modeling investment castings", JOM, Vol. 47, No.10, pp.64-68, 1995.
[14] E.A. Herman, Designing Die Casting Die, North American Die Casting Association, 1996.
[15] D.F. Allsop, and D. Kennedy, Pressure Die Casting Part 2: the Technology of the Casting and the Die, Oxford, New York: Pergamon Press, 1983.
[16] Die Design Manual, MMI Holding Ltd, Singapore, 1999.
[17] M. Hoffmann, M. and R.J. Arinyo, "On user-defined features", Computer-Aided Design, Vol.30, No.5, pp.321-332, 1998.
[18] Y.M. Chen, and C.L. Wei, "Computer-aided feature-based design for net shape manufacturing", Computer Integrated Manufacturing Systems, Vol.10, No.2, pp.147-164, 1997.
[19] A. Street, The Die Casting Book, Portcullis Press Ltd, 1977.
[20] B.Y. Feng, T.R. Han, Z.H. Yin, and W.S. Jiang, "Die casting die design", A Concise Handbook for Mold Design and Manufacture, Shanghai Technological Press, China, 1996.
[21] Unigraphics, Assemblies User Manual, Unigraphics Solution Co., Maryland Heights, MO, 1997.
[22] D-M-E Mold Base Catalogue, D-M-E Company, Madison Heights, MI, 1997.
[23] G. Glaeser, and H. Stachel, Open Geometry: OpenGL + Advanced Geometry, Springer-Verlag, New York, 1998.

第 5 章　CAE 在模具设计中的应用

5.1　概述

大多数聚合物模塑工艺和最终制品的质量，取决于加工时聚合物的混合、流动和塑化。塑料制品设计、模具和模塑成型工艺也起重要的作用。由于生产不断发展，需要提高制品质量、缩短模具制造和生产周期，现代的聚合物加工应该优化模塑设计。采用传统的反复试验的方法满足不了需要的。

注射模塑是广泛应用的聚合物加工方法之一，也是综合性的现代主流加工工艺。日益增多的塑料制品在各个行业，如电信、办公电子产品、医疗仪器、计算机和汽车等行业广泛使用。随着模塑工业的迅速发展，塑胶模具制作得越来越多。面对尺寸变化很大的各种制品，塑料注射模的生产必须要面对三方面的问题：模具生产周期要缩短；塑料制品整体质量要提高；模具设计要优化[1]。

为实现上述目标，在发展主流生产时 CAD/CAM 是首选方法，它能从本质上解决问题。CAD/CAM 提供的技术有：设计意图描述、设计方案拟定、解决分析问题及帮助实现物理设计。实现 CAD/CAM 可大大提高制品设计质量并缩短设计和制造周期。然而，单独应用 CAD/CAM 技术时，塑化效能优化设计的一些数据准备是困难的，很难确保塑料制品的质量。

CAE 技术能填补塑料注射制品生产中应用 CAD/CAM 的缺口。在完成实际工作和注射前，使用 CAE 软件能帮助设计者进行测试和检验，验证设计的正确性并优化设计。CAE 软件在制品设计者、模具制造者和模塑工程师之间起桥梁的作用。在塑料注射生产中，生产工艺设计者需要许多早期设计阶段的信息。塑料制品的三维几何设计和功能设计，必须同时适应其他因素。一些关键的影响因素，如制品结构、壁厚、塑料材料和性能、模具结构和布局、浇口的位置和数目、模塑工艺、收缩率和翘曲变形等都与制品设计相互联系。这些因素进而影响制品的质量。为促进注射生产系统的发展，CAE 技术能用来完成下述的四方面任务。

1）模塑制品设计。在制品设计中有两个关键的信息经常被讨论：制品的几何结构设计的优化，以及制品模塑能力分析。在本章中将讨论 CAE 应用中的这些信息。塑料制品的设计者在进行结构布局和几何参数拟定时，会遇到功能需求和专业设计，或者制品的可行性和检验等问题。除此之外，在充模分析方面，应

用 CAE 也揭示所设计的制品是否有良好的模塑能力。在制品设计方面，应用 CAE 可提供对制品结构和几何参数的修改意见，以改善其模塑性能。

2）注射模设计。在模具设计中，应用 CAE 能帮助模具设计者和制造者分析塑料制品的设计，识读决定性的制造和质量信息，得到推荐的解决问题的方法。CAE 的辅助处理能帮助确定模具布局、浇口位置，确定在单型腔、多型腔或成组型腔模具中的流道系统。CAE 也帮助优化注射周期，并设计冷却系统。

3）模塑工艺的确定。借助这方面的功能可确定工艺和工艺参量。在工艺设计中，应用 CAD 可保证模塑件有良好质量。而 CAE 提供了数值分析，如夹紧力吨位、注射计量量程、注射速率和聚合物流动等。

4）保证制品质量。由于模塑能力设计的差错，塑料模塑过程中常有缺陷产生。在实际生产中，有效控制模塑工艺能防止一些常见的生产缺陷。这些缺陷是由于较差的设计造成的，而且是能够避免和限制的。应用 CAE 能展现制品在质量方面的缺陷，并有合理的避免缺陷的建议措施，也能在设计阶段帮助设计者以更好的设计来避免缺陷的产生。

塑料模具设计的 CAE，需应用数字技术求解。用物理、数学和数字模型构成的数字技术的 CAE 软件，是较好解决工程问题的实用工具软件。物理模型遵循某些物理学理论，概括后可解决工程问题。举例来说，梁的物理模型遵循连续力学理论，被用来描述梁的物理特性，分析其状态、三维特性和材料的弹性等。数学模型用数学方程式，如微分方程、有限元方程等进行物理模型分析。此外，还要用数学模型来处理边界、初始条件和约束。数值分析技术，以 FEM 和 BEM 的数学模式描述单元类型、网格密度和解题参量。解题参量提供计算公差、差错界限、迭代和收敛判别等处理。

在注射模塑生产中，对模塑能力设计应用了图形和数字的交互技术。CAE 能解决所给的工程问题。在设计阶段的早期，要确保“设计的第一时间”能看到设计结果。设计早期的 10% ~15% 的功效，却要占到生产成本的 80% 还多。在注射模塑的 CAE 应用中，研制周期与它们的设计及生产成本一样起决定性作用。CAE 应用可避免设计过程中出现的变更。由于存在设计过程的迭代和 CAE 应用的边界，以上四个不同领域不能清楚地切割。在本章的 CAE 在模具设计中的应用描述里，将从以上分类中推出概图和大体轮廓。

本章中以各种程次的 CAE 应用来陈述模塑能力和生产质量的保证。在各应用模块，介绍借助 CAE 技术寻找优化题解的规律。本章还将回顾专业模具设计的 CAE 技术的发展，介绍主流模塑生产各发展阶段的范例，以及这门技术的限制和困难。

5.2　CAE分析的功能和过程

CAE分析工具是适用的软件包，它应用了FEM和BEM的数值分析技术。CAE分析工具能为工程师提供模塑加工期间在模具的型芯和型腔间聚合物属性的图形和数值分析结果。帮助设计者了解模塑属性和材料的流动现象，了解在设计阶段能避免和限制的塑料制品的一些差错。

综合模具CAD/CAM/CAE发展过程，CAE分析工具能直接输入CAD模型到CAE分析系统，进行结构和模塑的分析和模拟。随着计算机技术和软件的发展，它又增加了更简明和更方便的塑料制品和模具的设计分析功能。前期的CAE工具，使用者需要进行大量的前置工艺操作，要进行模型和数据准备，并执行后置过程，才能获得并输出分析结果。目前CAE的大多数的任务能自动完成。而且最后的结果和输出以图形呈现。CAE分析结果的界面阅读的主要困难在于需要模具设计和生产的专业知识和经验。本节将陈述CAE模具设计分析的功能和步骤。

5.2.1　分析过程

图5-1表明了CAE分析过程的细节。进行CAE分析，首先要创制注射件的CAD模型，它描述所有的设计和专业意图。在主流制品开发中，模型可直接输入到CAE分析系统，或者以数据交换技术将注射件CAD模型转换成标准的IGES和STEP数据格式。之后，设计者需要解决物理模型、数学模型和数值模型的专业模具设计问题。CAE分析工具遵照塑料熔体的物理模式，建立起注射过程的物理实体。根据用户设想需求提供二维、三维或轴对称图形，选择材料类型，决定专门物理边界条件和约束等。在数学模型方面，用户需要考虑单元类型、网格密度、计算参量、迭代次数和收敛准则等。这些

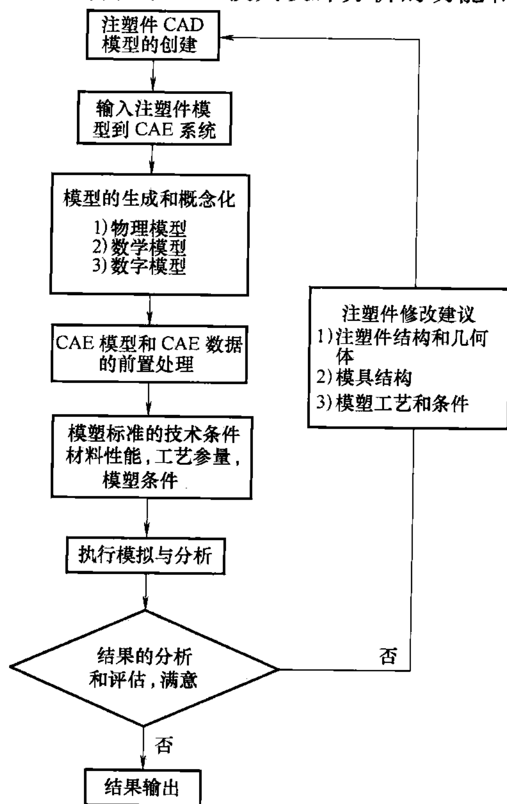


图5-1　CAE的分析过程

信息将支持 CAD 设计数据的前置工艺处理，并进一步生成 CAE 分析模式。在进行分析和模拟之前，用户要根据专门需要处理模塑信息、成型工艺参量和模塑条件。在进行分析和模拟之后必须对计算结果加以分析和评估。如果结果和题解不令人满意，建议修改注射件上相关结构和几何体、模具结构和成型条件，然后再进行下一轮计算。经迭代运行，直到所有的模塑功能、生产率和制品质量都满足设计要求，并得到最佳题解。

5.2.2 CAE 功能

CAE 注射模具设计应用技术可分为四类常见的分析和模拟功能：流动模拟、冷却模拟、结构分析和纤维取向预测。大多数 CAE 模具设计工具能够提供这些功能。

1. 流动模拟

流动模拟是塑料熔体在模具的流道系统中流动，和型腔流动充填时的动态分析过程。从注射件和模具设计的观点来看，流动模拟提供了模塑可行性分析，能预测注射件能否被完整地模塑，也能辅助浇口、流道和它们任何组合的优化设计。在工艺优化方面，流程模拟可帮助估算注射成型周期及夹紧力吨位等，确定最佳工艺条件和配置。从保证质量的观点来看，它有助于查明熔合缝、流动痕和气囊等缺陷的起因，并推荐克服这些缺陷的解决方法。

2. 冷却模拟

冷却模拟呈现了模塑成型中塑料熔融和凝固的过程，也给出了在塑料、模具与冷却管道中冷却剂之间的热传递分析。这将为冷却系统设计提供帮助，并能获知最佳冷却时间。此外，它也有助于设计者对模塑中产生的收缩和翘曲进行分析。

3. 结构分析

造型结构分析能验证注射件结构和参数在强度和刚度方面是否符合要求及技术条件，估算注射件最后的形状，并揭示模塑中收缩和翘曲的潜在原因。借助结构分析还可探索研究在最终制品形状下模具与局部冷却过程的关联。

4. 纤维取向预测

纤维取向由塑料熔体流动所促成，对注射制品的力学性能和结构具有显著影响。塑料材料中纤维取向还对注射件的最终翘曲程度有重大影响。纤维取向的预测，能用于估算注射件质量和力学性能，并揭示产生翘曲的根本原因。

5.3 CAE 在模具发展中的地位

塑料注射模塑过程 CAE 的好处之一是把很复杂的三维注射件形体构建成

“网格化形体”或“近似网格化形体”。制件在模塑模具中冷却和顶出脱模，最终成型为所需形体后再进一步制造加工。大型注射件形体的网格化，能在较短的导入时间构建。然而，它需要完整地考虑注射件设计、材料选择、模具设计、加工条件件和它们在模塑能力和制品质量方面的组合效应。使用CAE工具分析注射件、模具设计和模拟模塑过程，在制品生产工程早期就能获得最佳设计。CAE分析工具在模具发展生命周期中起到了关键的作用。

图5-2呈现了完整的模具设计和开发进程中CAE所发挥的作用。开始时要将拟创建的模塑制件输入到CAD系统中。注射件模型可以是实体的、表面的或线框式的。然后将原来的造型格式或标准数据转换成IGES或者STEP格式。输入了注射件模型到模具设计系统后，由于大多数计算机辅助模具设计是以三维为基础的，需将表面的或线框式的模型转变为实体模型。在模具结构的设想尚未落

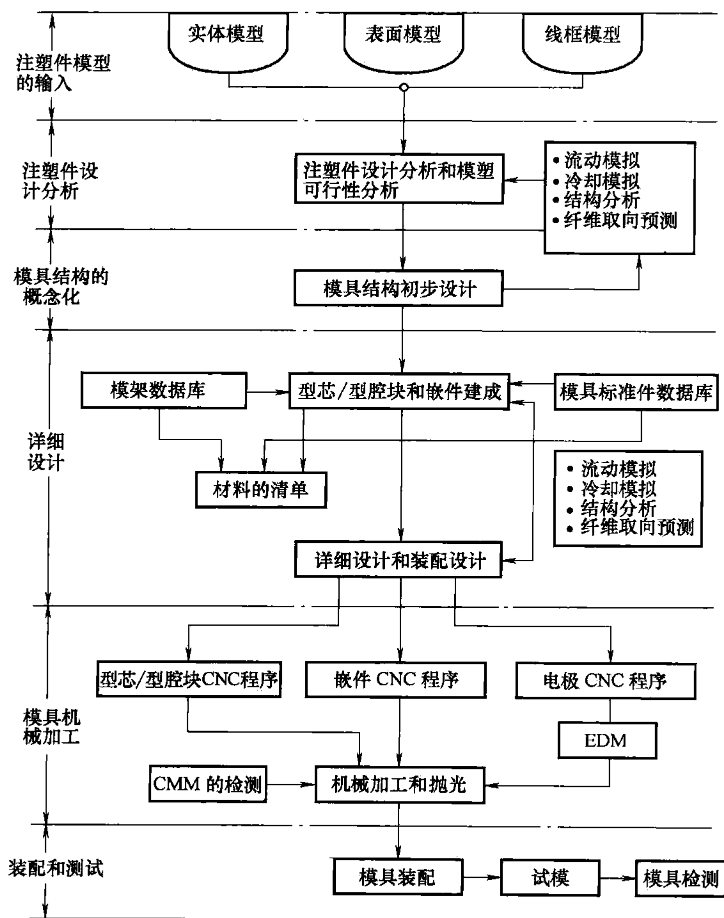


图5-2　CAE在模具开发中的作用

实前，必须分析注射件，评估可塑性。从注射件设计和模塑可行性评估到模具概念化是个迭代过程。因为这个模具设计过程需要进行注射件结构分析、塑料流动模拟、冷却仿真及纤维取向预测，所以 CAE 分析将起关键作用。一旦模具结构初步确定就可进入型芯块/型腔块的详细设计了。在型芯块/型腔块的创建中需要设计型腔数目和布局，设计浇口、流道和冷却管道，还要考虑一些其他模具零部件，包括侧型芯、侧型腔和成型杆等。在这细节设计阶段，CAE 将帮助解决上述四种模拟和分析所涉及的设计问题。完整的模具零部件设计和装配设计完成后，系统进入 CNC 处理，完成切削加工、装配、测试及模塑检验，精细地调整关键零部件。这些对模塑参数和制品的质量都有重大影响。

5.4 CAE 在模具发展中的作用

注射模塑生产发展涉及到以下四个领域：模塑材料的选择；注射模塑件设计；注射模具设计；模塑工艺的确定。四个领域的设计都同样重要，变更任何一个都会影响其余几个。过去，以上各方面的决策，通常采用经验法则和试错法，进行以经验为基础的前期设计或者与一些引导理论相结合。上述四个领域间有多样的相互影响，正确地评估、分析和预测是很难的。按以往的模具开发范例来解决实际问题，要产生最佳设计是不可能的。而采用有效的计算机技术和 CAE 工具对这些混杂问题进行分析将成为可能，而且其分析时间和成本明显减少。CAE 技术用到了模塑中各种物理现象和变量，可帮助解决以上四个领域的技术问题。以下各小节将集中讨论 CAE 能做些什么。

5.4.1 CAE 的含义

计算机辅助工程 CAE 运用物理和数学原理处理客观工程问题，帮助设计师科学地解决问题。在注射成型过程中，CAE 可通过下列几类变量来揭示模塑过程物理现象，并提供解决实际问题的基础。

1. 物理变量

在注射成型过程中，在型腔里相关的模塑现象中的物理变量很重要。只有它们能帮助设计师真正了解这些现象。在以下几小节，将阐述和解释这些物理变量[3]。

(1) 压力

在 CAE 分析中，模塑期间塑料熔体承受的是作用在单位面积上的法向力，它们形成可变的区域场。模塑期间的压力是随时间和位置变化的函数。当充填刚开始时压力是 1 个大气压。塑料熔体的前锋到达后，压力连续地向后续料流增加。在进行 CAE 分析时，压力是节点的变量，有限元单元内的压力，可运用单

元节点上变量的内插来表示。

在模塑时，涉及一些压力变量概念与流动有关，压力梯度是其中之一。就像水或其他液体一样，塑料熔体流动总是从高压区向低压区的方向流动。换句话说，它流动的方向与负压力梯度一致。在模塑成型中，瞬时压力梯度定律指出，沿着流径的压力梯度越大，充填模式越有效。一些流动现象与压力梯度有密切关系，如滞流、溢流和欠注等。不稳定的压力梯度会造成这些问题，并最终影响制品质量。.

（2）温度

塑料熔体的温度是节点的变量。单元体温度的值能用此单元的节点温度插值计算。温度是冷却分析的直接输出。在成型过程中，塑料熔体的温度随时间和位置变化。从温度分析中获知平均温度和体积温度，这在模塑过程分析和质量控制中是很重要的。

在充模成型中，不均匀的温度分布对制品质量有重要影响。不均匀的温度会导致热点。热点温度过高，则造成胶化，进而在冷却成型中产生不同程度的收缩和翘曲。

（3）剪切速率

塑料熔体的剪切速率也是节点变量。单元体的值也能利用节点剪切速率插值确定。剪切速率定义为流速在厚度方向的微分。在流动通道里，塑料熔体中央层的剪切速率等于零，在塑料熔体与流动通道的界面上达到峰值。

剪切速率为塑料熔体的流动或变形速率。从流变学观点，剪切速率与塑料熔体的粘度密切相关。因此，充模流动的剪切速率的分布影响到模塑过程中塑料熔体的流动性。对于设计者，需要知道剪切速率分布。

（4）剪切应力

塑料熔体的剪切应力是单位面积上的剪切力。它也是节点的变量，单元体上的剪切应力也能由节点的值决定。与剪切速率相似，剪切应力的流道中心线或中央层的剪切应力等于零。在流道壁和塑料注射模具的界面上有它的最大值。

剪切应力影响纤维的取向。剪切应力越高，聚合物的纤维取向越严重。由于剪切应力的最大值在塑料熔体与模具型腔的界面上，最高纤维取向在模腔表面附近。过大的剪切应力也会使熔体破碎，因而它的值应该控制在某个范围，在模塑成型时避免裂纹，减小纤维方向，以改善模塑制品整体质量。

（5）速度

塑料熔体的流速再次成为节点变量，它表述为模塑中瞬间运动方向和该点的速度。有限元单元的速度由它的节点值决定。在进行CAE分析时，用平均速度描述塑料熔体流动。平均速度通常用单元体的平均速度来定义。

在充模流动中，速度与成型流动模式密切相关，它直接关系到流动的现象，

如熔合、流动痕、滞流和湍流等。在单向流动的原则中，聚合物熔体在一个方向流动，流体前锋应以直线流动贯穿整个阶段。聚合物熔体流速决定了流动形态，并进而帮助设计师有效设计浇注系统，取得平衡流道和完成模具设计。

(6) 夹紧力

锁模夹紧力可由分型面上压力及流道和型腔的投影面积推算。它是流动充模进程中的变量和不同时间的函数。充模阶段结束时，夹紧力达到峰值。精确地计算夹紧力是困难的，但作出的估测值很有用。预测的夹紧力能用来帮助选择注射机、决定型腔数目和进行详细设计模具。

2. 混合变量

在注射成型中，有些现象不能用以上各个物理变量所描述。这些物理现象仅能用上述变量的组合来解释。这些组合的变量在本书中称为混合变量（hybrid variable）。一些主要的混合变量将在以下的几小节中陈述[3]。

(1) 熔体前锋的推进

熔体前锋推进过程是塑料熔体前沿的运动过程。熔体前沿推进至各节点的时间为熔体前锋的到达时间。熔体前锋推进作为节点的变量，单元内的值能用节点值来确定。它揭示模具内发生的物理现象，重要的现象之一是流动平衡。要求所有模具内流动途径都得到平衡，即以均衡压力在相等时间里充模。如果模塑成型过程不平衡，有的区域过早充满会产生溢料，而较迟充填区域则会产生欠注。熔体前锋推进揭示了是否存在不均衡流动，并确定一些缺陷，如熔合缝、流动痕和气囊等。此外，详细设计方案能在熔体前锋推进基础上修改，如浇口位置重新定位、注射件参数调整等，以取得均匀和平衡的流动。

(2) 芯部和皮层的取向

聚合物芯部和皮层的取向是单元体的变量。每个单元的芯部取向是在充模结束时速度的横切方向，这是最有可能的纤维方向。其他可能的方向是速度矢量方向。单元体皮层的取向通常沿着单元的速度方向。这将会是注射件外表层最可能的纤维取向。

揭示芯部和皮层的纤维取向，对预测注射件的力学性能起关键作用。可以确认，皮层取向能导致力学性能增强，如冲击和拉伸强度等。在此基础上，模具设计者能确定合适的浇口位置，前置设计塑料熔体的流动模式，以保证注射件在一定方向上有良好的力学性能。

(3) 质量缺陷

预测注射件缺陷是 CAE 应用的主要功能之一。缺陷预测也是 CAE 分析的主要输出变量之一。通常输出预料中的一些主要缺陷，如熔合缝、流动痕和气囊等。熔料分离后，相对方向的两股前锋相遇时形成熔合缝。如果两股熔料前锋相互平行流动，位于它们之间熔合位置就会产生流动痕。气囊是聚集在塑料熔体中

的空气所形成的。在CAE分析基础上，以速度方向和熔体的推进来获知这些缺陷的发生及其发生位置。试验测试能适当改善流动均匀性，避免或限制缺陷的产生。通过改变浇口位置、注射件结构、浇口和流道的尺寸等措施来减少敏感区。CAE分析也能帮助寻找真空泡的位置。

5.4.2 注射制品设计的CAE

CAE在制品设计方面可帮助设计师优化注射件，研究解决设计中影响制品成型和质量的有关问题。一般来说，CAE在注射件设计应用的功能，可以归纳为以下三个方面。

1. 注射制品结构优化

塑料模塑成型制品作为零件通常直接用于产品装配。它们有具体的结构和参数规格。在注射件的设计过程中，通过制品实际工作环境的模拟，应用CAE能帮助优化它们的结构和参数。此外，CAE也能帮助验证和核实设计中遇到的强度和刚度问题。

2. 注射制品的模塑性能

为了保证注射件有良好模塑成型性能，在制品设计各阶段设计者需要考虑的一些基本问题。首要问题是确定制品上浇口的位置。流行的CAE工具可以帮助设计者通过模拟塑料流动确定最佳浇口位置。它能揭示最佳浇注位置和绝对不能接受的区域。在浇口位置决定后，设计者进一步研究注射件的模塑性能，分析可能存在问题的区域。

3. 制品质量

模塑质量是设计师要考虑的重要问题。即使最终的几何形体和参数能满足所有的技术条件，但注射件对于有些物理性能和内部缺陷也是不能免除的。所有缺陷是由一些不合理的变量值，诸如剪切应力、剪切速率、冷却时间、料流前锋推进、温度和压力分布等引起的。举例说，过大的剪切应力会强力降低注射件的机械强度，促使其提早失效，从而缩短了制品的工作寿命。CAE工具能帮助设计者确定注射件是否存在质量问题，并在早期设计阶段就暴露一些影响质量的变量，从而保证注射件有良好质量。所有这些功能，在生产实施阶段也能帮助避免和消除质量问题。

通常，CAE工具允许制品的设计师在设计的早期搜寻和识别一些关键的质量问题和模塑性能。此外，设计者也能在CAE分析结果的基础上，得到一些解决问题的启发，从而改善制品设计。在模具制造后期对设计的修改中，可保证生产有正确的进程，并避免和消除对质量有重大影响的因素。

5.4.3 模具设计的 CAE

在设计模具时，设计者需要建立最好的设计策略，应用早已验证的设计经验和已知原理。在具体设计项目时，要借鉴所有规则讨论过的问题和设计方案，利用CAE 分析工具帮助解决设计问题，并完成最佳设计方案。CAE 分析软件给模具设计提供了各种工具来验证注射件设计，并优化模具的浇注和冷却系统的设计。

1. 验证注射制品的设计

模具设计者在设计模具之前，需要验证模塑制品的质量和制造要求，必须对注射制品进行模塑成型可行性分析和质量要求分析。从制品设计的角度优化它的设计。从制造的角度，模具设计者也要考虑到其制造工艺性能并确保制品质量，应考虑模具制造企业的模具制造条件和设备。

2. 模具布局

一旦制品设计被接受，就可开始模具设计的实际工作了。模具布局设计的第一阶段是确定型腔数目、制品模型的定向和型腔块里的布局。模具的型腔数目基本上由生产批量决定。是否完全满足需求，还要进一步由实际情况而定。在详细设计多型腔模具时，还需要考虑在型腔块里单个注射件的方向，并确定两个型腔之间距离[5]。在这个过程中，基于塑料熔体流动模拟和平衡分析，CAE 工具可帮助确定模具的布局。通常，模具布局设计应该在浇注系统模拟中完成。

3. 浇注系统设计

浇注系统，又称为流道系统或输送系统，由主流道、分流道和浇口组成。通过浇注系统，聚合物熔体流入到各个型腔内。浇注系统对注射件质量、模塑生产率和生产成本方面有重大的影响[5~10]。注射件要达到良好的外观和内在质量要求，浇注系统不再凭单独的直觉设计。过去，流道系统设计过程基于试模和纠错方法。流道系统要在多次上注射机的试模中进行调整，其参数被逐次扩大，随着塑料流动和冷却模拟进行，模具设计者可以反复研究流道的表现，直到获得良好质量。

在浇注系统设计中，CAE 工具仅为设计者提供支持决策过程的信息。整个设计要遵循相关设计理念、公式和用户定义的浇注系统标准。以浇口的设计为例，浇口数目应根据充满型腔的压力和浇口最少数目原则来选择。模具中浇口位置对注射件质量有很大影响。浇口位置影响模具的排气、翘曲、收缩、溢流和欠注。因此，浇口位置应该在流动平衡原则上决定。明确给定的设计标准，包括注射件的翘曲缺陷、关于流动痕和熔合缝的美观要求、聚合物材料的抗冲击强度等工程特性[9]。CAE 分析工具支持浇口设计，可用来分析浇口数目、位置和参数是否优化，确保满足所遇到的有关设计要求。相类似，在流道设计中也要保证有良好参数，理想的情况是确保在同一时间有相同温度使塑料熔体流动前峰到达流

道的终点。此外，流道还要起使塑料熔体流动速率均衡的作用以便使熔体以相同进度将各个型腔充满。因为塑料熔体在每个流道中的条件和表面阻力是不同的，要取得这样效果很难。而且在浇注系统设计中，良好的流动模式应能克服出现任何弊端。CAE分析工具能支持优化设计，分析和验证设计方案是否满足上述要求。此项工作是个迭代过程，最佳浇注系统设计方案经过修改，它的参数要几经流动和冷却的模拟验证。

4. 冷却系统设计

模具的冷却时间在几乎所有塑料的模塑中，在整个循环周期中占有最大的比例。在注射模塑中，模具的冷却时间在循环周期中占比大于75%。因而，减少它对缩短循环周期有很大潜能，改善冷却设计就能提高生产率。换言之，以均匀平衡的冷却为目标的设计，能减少收缩率的差异，降低内应力和翘曲，进而改善注射件的质量[11~13]。因此，冷却系统的设计目标是取得快速、均匀和平衡的冷却。典型的设计变量，包括冷却管道的尺寸、它们的位置和连接、冷却流体及其输入温度、在每个管道中的流速等。得到最佳设计所需要的分析工具，应能预测冷却时间和注射周期，预知每次循环中聚合物熔体释放热量，了解塑料熔体温度和分布，以及每个冷却管道在热传递中可带走的热量[11]。

按以往习惯，设计冷却系统采用冷却原理所支持的传统方法，结合过去的经验采用试模和纠错法进行。应用传统方法，进行热传递分析是困难的。热传递分析涉及到塑料熔体、模具、冷却液和模具内的温度分布，涉及冷却管道数目、尺寸和位置，还要研究冷却设计与制品质量及生产率关系，所以解决这些问题也是困难的。流行的CAE工具能帮助设计者在冷却系统设计与热传递分析中获知从塑料制品到模具型腔表面，从模具到冷却液的温度分布。

在详细设计冷却系统时，需要明确设计的目标函数、变量和约束。它们应该是容易实现和解决的。以设计变量为例，共有四个：冷却管道数目、尺寸、位置和冷却液流速。

最佳的设计需要CAE工具将冷却问题与优化处理一起模拟。结合CAE分析和优化处理，能产生较好的设计方案。

5.4.4 工艺设计的CAE

注射成型过程由三个主要方面组成：充模流动、熔料保压和制品冷却。注射循环开始时，在模塑温度下塑料熔体充填型腔。在模具所有型腔充填后，一些添加的聚合物熔体，需要在很高的压力下补充到型腔里，以补偿注射件的收缩。模具冷却过程中，聚合物熔体冷却并固化，本质上是从注射件向模具表面和冷却液传热，直到注射件有效固化后从型腔中顶出。脱模顶出是注射循环中最后的动作过程。前三个是模塑过程中的主要过程。

随着对注射模塑成型高质量塑料件需求量的提高，由于注射机种类、模具结构、操作者技能与塑料材料性能复杂的连带关系，因此存在相关生产的问题，使模塑成型生产周期延长，成本提升。

在模塑工艺设计时应用 CAE 可帮助设计者确定工艺条件和参量。当一些工艺条件和参量需要在注射件的特性基础上决定时，才能基于塑料性能确定模塑成型条件。CAE 应用在工艺设计中能进一步提供深层次分析，得到模拟结果的信息，确定最佳工艺条件和参量。对一些宏观的缺陷，如欠注、飞边、焦斑、凹陷、可见的熔合缝和翘曲等，能提供一定的决策参考，有效解除它们的初步影响。

在模塑工艺设计中需要进行的分析，包括流动模拟、冷却模拟、注射件结构和纤维取向的预测等。这些分析将引导在注射件的设计阶段或模具设计的早期，选择决定注射机的加工参量，或者进行工艺的调整。由于各种分析和模拟仅能揭示各自相关信息，设计者需要综合以上资料，通过所有的模拟结果和迭代分析的混合，基于不同加工工艺类目的建立，才能搞懂在模塑加工循环中内在的和明显的现象，并且设计出最满意的模塑工艺。

5.4.5 CAE 保证制品质量

较差的模塑工艺设计和塑料熔体流动模式的欠缺会使塑料成型产生一些微小缺陷。为了避免这些缺陷，改善制品质量，要调研和揭示产生这些问题的根源。应用 CAE 分析工具可以实现这个目标，在一定程度上帮助避免或消除这些质量上的缺陷。

1. 熔合缝和流动痕

当两股或更多塑料熔体的流动前锋在模具型腔里相对而遇时会产生一条很细的熔合缝。流动途径中的塑料熔流绕过障碍分离后在另一侧聚合时也会形成熔合缝。熔合缝是在模塑加工期间由于不规则的流动模式而生成的制品缺陷之一。

流动痕也是模塑加工中流动缺陷。它由两股流动前锋在相同方向上相持而形成，也是不规则的流动模式造成的。注射件上的熔合缝和流动痕会降低所在区域的力学性能。如果它们不能消除就会波及到不敏感的区域。

在复杂模塑中应用 CAE 软件工具能揭示这些缺陷的成因，并从根源上找出相应的解决方法。

2. 收缩

模具中的聚合物从模塑温度下降到环境温度时由于密度变化而产生收缩。在分子形态下松弛聚合物分子链的收缩是聚合物分子链与相邻分子链排列并缠绕的过程。对于高度结晶的聚合物，由于形成致密的晶体结构而产生更大的收缩。对于较厚截面的注射件，由于塑料熔体缓慢冷却会使制品的收缩变化很大，一些区

域会有凹陷出现。收缩的变化将在注射件中诱发残余应力。如果残余应力超过了制品强度极限，就会产生翘曲或开裂。通常，更高的模塑熔料温度和模具温度，会由于更大的分子能量和随后的缠绕能力使塑料熔体有更大的收缩。采用更高的保压压力可以补偿它的收缩。

CAE在收缩分析方面的应用能预测产生收缩的原因。首先它可以回顾纤维取向，指明最大收缩的方向，给出预测的收缩率，以便采取避免和限制收缩的措施。它也能预知注射件不均匀的温度分布和不平衡的冷却将会产生的收缩差异。高的成型压力会促使聚合物密度变化，进而使注射件的收缩更不均匀。为预测和限制收缩率，需要把模具的冷却模拟和压力模拟与热传递模拟分析结合起来[16]。

3. 翘曲

注射件里分子链的取向将使制件产生翘曲变形。在塑料模塑成型中，塑料熔体沿着很小的型腔间隙通道流动，分子链因此沿着流动方向变形延伸。当塑料冷却时，分子链试图松弛成原始的缠绕状态，但由于快速冷却使已变形延伸的分子链不能松弛到原始的缠绕状态，大部分处于非缠绕状。模塑凝固后，分子链仍试图恢复缠绕结果造成了注射件的翘曲。另一方面，翘曲被认为是收缩率差异所致。在模塑成型中，高分子和纤维的取向、温度的变化、保压变化和压力差异等都会促使收缩率产生差异。

应用CAE翘曲分析，在模拟预测纤维取向、冷却模拟、充模流动和保压分析。在注射件结构分析基础上，能够认识翘曲原因。从这些分析。可以检测翘曲位置和程度，识别减少和限制翘曲的适当措施。模塑中通过改善流动和冷却均匀性，减少收缩率变化，能解决翘曲问题。

4. 气囊

气囊是由注射件里的气体积聚产生的。模塑期间的塑料熔体在流动过程中熔体里内含的气体跟随运动，当气体不能有效排出时就会积累在注射件中形成压缩空气泡，称为气囊。

CAE流动模拟能分析气囊的形成过程和位置。气囊也是模塑中熔料前锋推进的结果。通常，如果气囊在注射件的表层，用模具设计中的排气孔很容易排出。如果气囊在注射件的里层，已进入塑料熔体内占据了空间并凝固成块，则这些气囊在过热的位置会使注射件产生热斑。CAE分析能帮助确定浇口位置，以避免气囊的产生。

5.5 应用实例

设计塑料注射模具和金属压铸模具时应用CAE工具，已有20多年的历史。有很多成功的应用案例。在本节里将介绍一个注射模应用CAE进行冷却分析的

实例和另一个压铸模具设计应用 CAE 的实例。通过模拟铸造过程，辅助进行模具和工艺设计，介绍 CAE 应用在注射模和压铸模辅助设计中的一些情况。

5.5.1 注射模的冷却分析

本例对一个模塑成型的塑料相框的具有热流道系统的模具进行冷却分析[19]。用两个安装在模具里的热感应器和一个压力传感器获知作用数据。模具总体的冷却分析使用 ABAQUS 系统完成。ABAQUS 是一款商业化的有限元分析软件。用热流道的热量输入和扩散试验来调整模拟结果，找出其对模具冷却的影响，并依据分析结果重新设计冷却系统。

1. 研究方法

有限元分析的关键是模具模型生成。在生成模型时，必须以充分假设将工程实际问题概念化。在本例中，为使问题简化，减少运算时间，对建起的模具总装模型作以下假设。

1）相对冷却时间和充模时间是非常短的，聚合物熔体的温度在注射充模期间假定是不变的常数。

2）忽略模具壁面与注射件之间空隙的存在，在两者之间按完全的热传导推算。

3）与热流道喷嘴接触的表面温度，以传感器测定的常数为准。

4）周边空气与模具外表面之间自然对流热损失在大多数注射模塑中少于5%，可被忽略[16]。

5）在冷却管道里的冷却液与模具之间的热传递，假设是稳定的。

三维分析的整体能量平衡方程如下

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{5-1}$$

式中 ρ——密度；

C_p——比热容；

T——温度；

t——时间；

K——热导率。

简化后的边界条件可定义为下面的含义。

1）与热流道喷嘴接触的表面有恒定的温度。

2）充模阶段的聚合物注射温度简化成恒定的平均温度。

3）在冷却液与冷却管道之间存在热传递。

后者取决于式（5-2）。

$$-K_m \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_c) \quad (5\text{-}2)$$

式中 下角标 m 和 c 表示为模具和冷却液；

h——传热系数（heat transfer coefficient）；

$\frac{\partial}{\partial n}$——边界表面朝外的法向微分。为了充分地传输热量，冷却液应是湍流流动。雷诺（Reynolds）数是检测流动的参数，定义为

$$Re = \frac{v_c D \rho_c}{\mu_c} = \frac{Q_c D \rho_c}{A_c \mu_c} \quad (5\text{-}3)$$

式中 v——流速；

D 和 A_c——冷却管道的直径和截面积；

μ——绝对粘度；

Q——冷却液的流量。模具冷却时，建议取雷诺数 $Re > 4000$，以使冷却液为湍流流动，最好取 $Re > 10000$。经 Dittus-Boetler 修正，应用到圆管道中湍流的热传递，h_c 传热系数为

$$h_c = 0.023 \frac{K_c}{D} Re^{0.8} P_r^{0.4} \quad (5\text{-}4)$$

普朗特（Prandtl）数 Pr 定义为

$$Pr = \frac{\mu_c}{p_c \alpha_c} = \frac{\mu_c (C_p)_c}{K_c} \quad (5\text{-}5)$$

这里的热扩散系数 α 定义

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \quad (5\text{-}6)$$

此模具温度的初始条件等于冷却液的温度。在注射循环开始时将模具加热，它需要至少10个循环周期后才能达到稳定状态的温度。以前个循环周期结束时模具温度分布作为新冷却循环的初始条件。由于输入和输出的冷却液温度差是较小的，在冷却液和管道间的热传递作用可被忽略。在整个循环中，当热传递到冷却液低端的某温度，用式（5-4）计算传热系数。分析中的时间增量由 ABAQUS 决定。

2. 条件分析

使用 ABAQUS 分析软件完成分析。ABAQUS 运行的冷却分析是瞬态耦合的热传递分析。几个或两个阶段的热传递组成了循环周期，直到循环稳定。起始阶段代表充模阶段，在这个阶段要全部应用三个边界条件。最后阶段代表冷却阶段，此阶段中热态聚合物熔体的平均温度在边界条件下被降低了。

具有热流道的总装模具，其冷却模拟分析如图5-3所示。安装热传感器测量温度。热电偶的一个置于型芯一侧，另一个装在热流道喷嘴侧面，则表面温度可被测量。为优化注射条件也安装压力传感器，并记录型芯承受的压力。

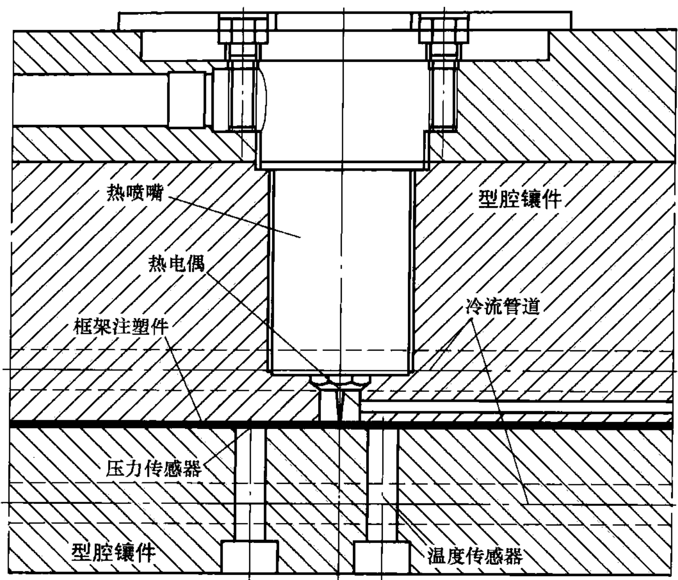


图 5-3　具有热流道的模具总装[19]

图 5-4 和图 5-5 说明了型芯和型腔的原先冷却设计。模具冷却管道和压力腔槽之间距离为 12mm。两冷却管道的距离 d 较宽，且不是常数。推荐 d 为冷却管道直径的 3 ~3.5 倍。用相等的 d，反而不能得到冷却均匀的效果。因而，须进一步改善和修改设计。相框塑件的尺寸为 157mm × 177mm × 1.8mm，体积为 45 907mm^3。型芯和型腔镶块的装配尺寸是 210mm × 210mm × 95mm。材料性能和制造条件各列在表 5-1 和表 5-2 中。

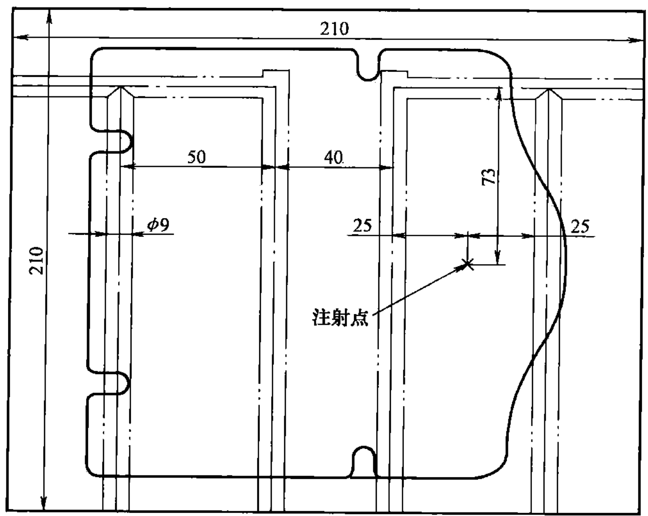


图 5-4　型芯的冷却管道布局

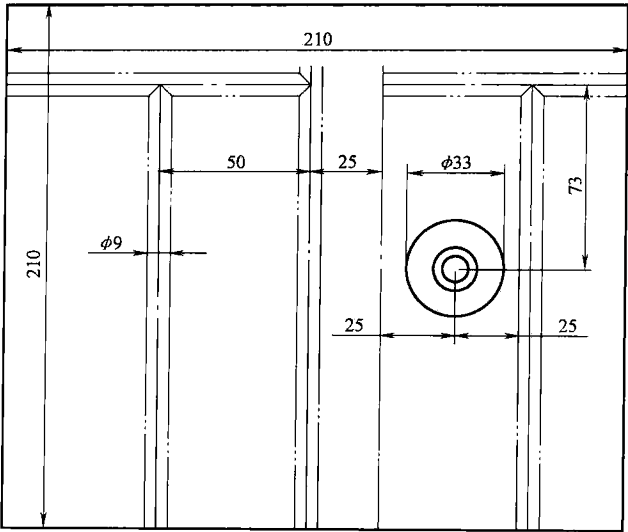


图5-5 型腔的冷却管道布局[19]

表5-1 材料主要性能[19]

材　料	30℃的水	钢	塑料(HDPE)
密度/(kg/m^3)	996	7800	950
比热容/[J/(kg·K)]	4177	460	2200
热导率/[W/(m·K)]	0.6155	36.5	0.5
运动粘度/(mm^2/s)	0.801	—	—

表5-2 注射件的模塑条件[19]

条　件	值
平均注射温度/℃	240
平均脱模温度/℃	80
平均模具温度/℃	70
冷却液温度/℃	30
热流道喷嘴接触表面温度/℃	100
注射时间/s	1
冷却时间/s	16
冷却液流量/(L/min)	10
表面传热系数/[W/(m^2·K)]	11621

在模具总装的基础上进行分析。用ABAQUS系统自动生成三维的四面体网

格。不同单元的尺寸被分派指定，重要表面的边界条件被细化，而其他表面是近似的。方案可保证对少数单元准确模拟。但是，如表5-3所示的节点和单元的数目仍然是较多的。

表5-3 模拟时节点单元数目[19]

	框架注射件	型　腔	型　芯
节点数目	1755	10130	8914
单元数目	4982	45516	38758

3. 分析结果

第10次循环结束时，温度的分布如图5-6和图5-7所示。注意寻找50～80℃温度，在此范围内相同颜色的温度作为邻接的边界温度。模拟的结果与实验结果吻合。可看到没有冷却管道通过的区域和在 d 为40mm和50mm的两冷却管道之间区域是较热的。此外，如果输入的热量不立即带走，型芯的左侧会越来越热。这样，不平衡的温度分布会导致注射件翘曲变形，迫使循环周期进一步延长。用压力传感器测量时会发现，不良的冷却设计，还会引起较高的注射压力。通常，在注射阶段注射压力会下降。由于模具温度分布不均衡的影响，在熔体前锋从热区到达较冷的区域时会存在压力的反弹。

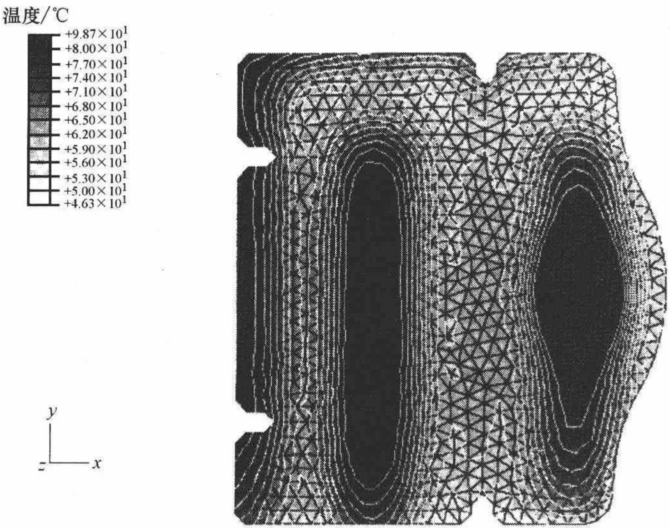


图5-6 塑料框的温度分布[19]

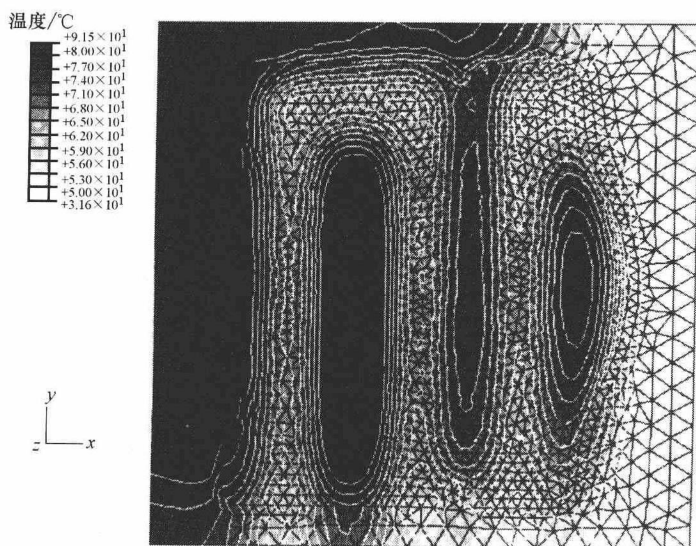


图5-7　型芯的温度分布[19]

平面和薄壁制品对不均匀冷却往往非常敏感，必须减少间距 d 和限制热区，以缩短循环时间，改善模塑制品的质量。图5-8展示了对型腔冷却设计的修改，型芯的冷却设计也因此而作相应的修改。模拟结果如图5-9和图5-10所示。修改后的设计比原先的温度分布更均匀，冷却时间也从16s缩短到10s。

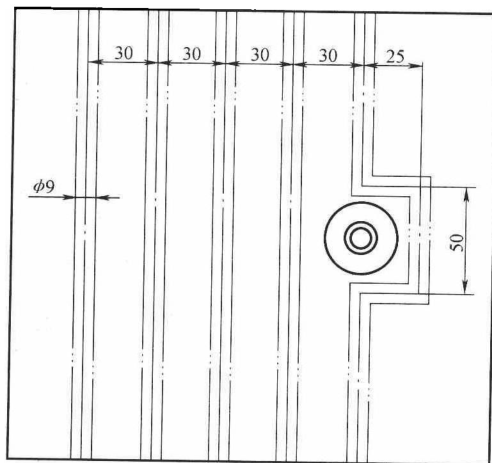


图5-8　冷却管道布置的修改[19]

由于热流道喷嘴在注射期间中保持恒定温度，所以对不同的冷却设计，它的热量输入是有差别的。可以看到，热流道喷嘴的影响是有限的，修改设计后并没有缩短冷却时间。

5.5.2　压铸过程的模拟

与塑料注射模类似，金属压铸也有较高的生产率，其加工过程综合了许多当今主流制造工艺。在压铸加工过程中熔融金属注入型芯和型腔之间空隙，生产“接近形状”的制品。挤压铸造也是常用的铸造方法之一，它接近模锻，也组合了压力铸造工艺。半固化金属铸造是另一种流行铸造工艺过程，它使金属在半固化条件下模塑。

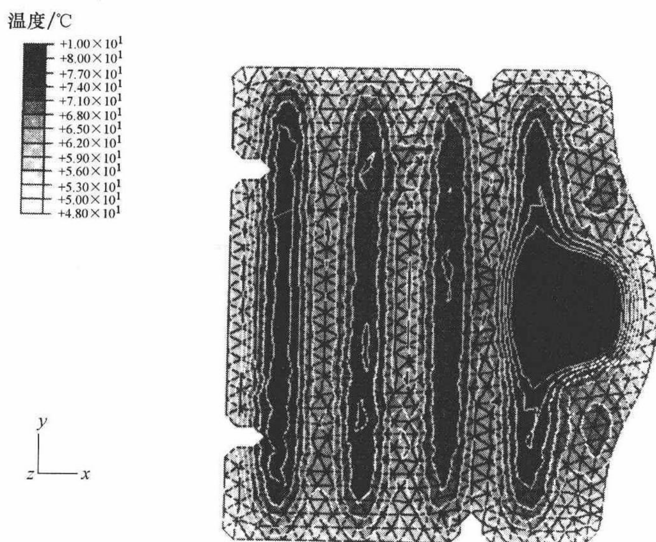


图 5-9 注射框设计改进后的温度分布[19]

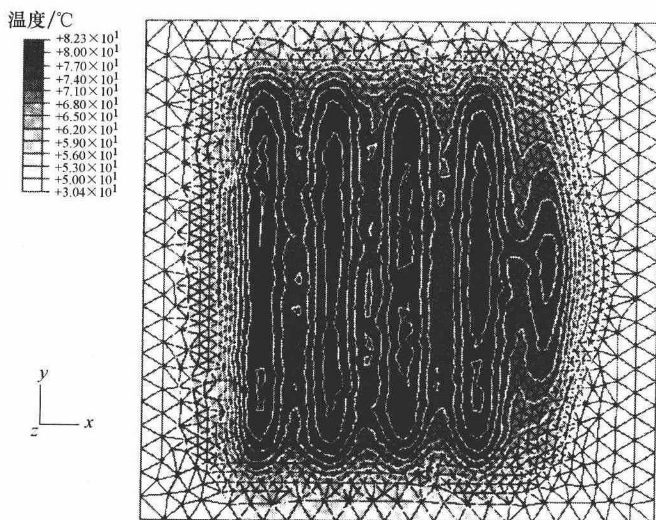


图 5-10 型芯设计改进后的温度分布[19]

压铸成型 CAE 模拟，为模具和工艺设计者提供了宝贵的工具。它可帮助改进工艺和模具设计，强化制件设计并缩短开发时间[21-26]。在保证制品质量方面，CAE 模拟有助于预测制品质量，如预测宏观偏析形成和分布、预测微观固化颗

粒、分析制品中的气孔等。CAE模拟可帮助揭示模具和金属熔料的热传导及温度分布。通过充模流动模拟，CAE模拟也有助于验证工艺参数和模具结构。这些努力的主要目标是改善制品质量，降低生产成本，缩短制品的开发周期。

图5-11所示的是鼓轮架的挤压铸造生产过程，以此来说明CAE在挤压铸造加工中的应用[25]。鼓轮架的材料是铝合金。模塑充填加工，用商用软件包MAGMA模拟。MAGMA是为铸造和模塑加工的优化而开发的模拟工具。铸造模拟的目标是评估和调研挤压铸造制品的可行性。在图5-11上展现了其充模过程，可获知挤压鼓轮架过程为层流的模拟结果。

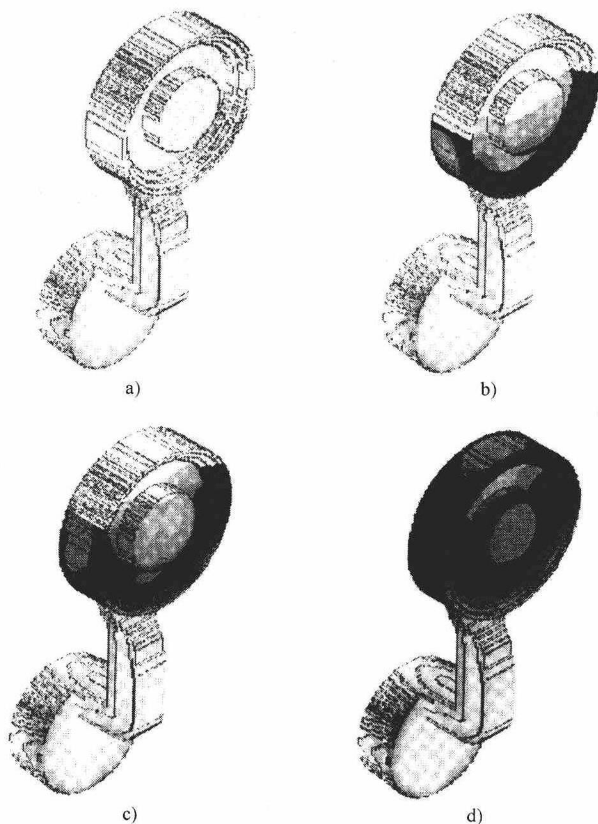


图5-11 鼓轮架在挤压铸造中的充模过程[25]
a）60%充填 b）75%充填 c）85%充填 d）100%充填

另一个压铸实例如图5-12所示[25]。这是个半固态金属铸造的小型计算机转动开关制件。通过一系列的模拟过程发现，金属的温度分布和模具的最低温度保持相反。图5-12显示的是模拟的温度分布结果。

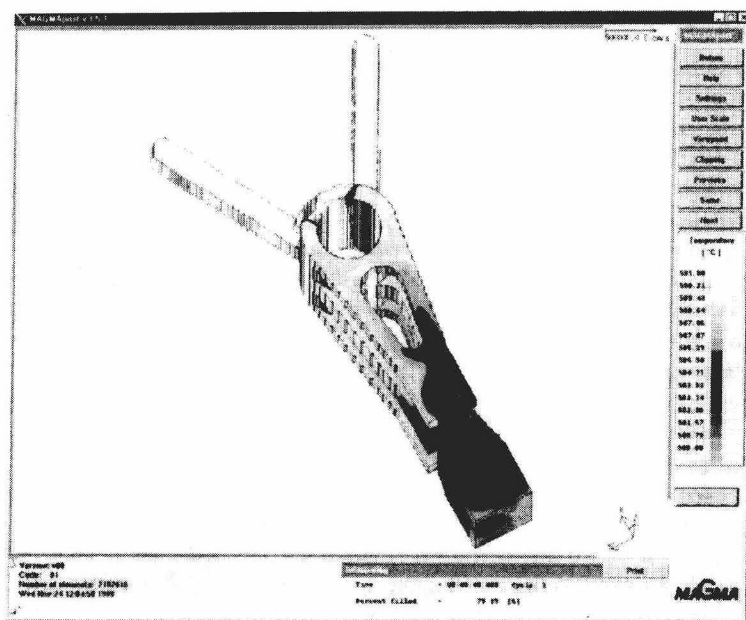


图5-12 铸造充填模拟[25]

5.6 模具设计CAE的新挑战

针对注射模具设计的CAE软件工具已在市场上流行超过了20年，目前被广泛应用在模具工业中。CAE技术在模具工业中关键的作用毋庸置疑的。但是，现行的CAE在拓扑的严密性、计算效率、数值的精确度和预测功能的准确性等方面还不能满足模具工业的需要[27]。当前的CAE应用实际确实存在着一些限制，并面临困难的挑战。对此，模具制作工程师应保持充分的清醒，不要误解和过度相信CAE的功能[27-29]。

为探根寻源，以下讨论只限于模式问题和复杂的模塑工艺。从模式的角度，模具被充填的过程是最困难的。在典型的充模过程中呈现以下物理现象。

1）多元的不稳定流动和不混合的流体。典型的充模状态，至少存在四种“流体”。它们是模具材料、模具型腔中气体、充填型腔的塑料熔体和固化的塑料[27]。

2）动态和动力学的结合。在典型的模塑过程中，上述四种“流体”中的两者界面上由于流动和界面的物理现象，如表面张力和相变、不规则的拓扑等，而且存在动态的变化，所以存在合流、撕裂和细流等缺陷[27]。

3）动态的热传递。在模具的充填和冷却过程中，存在动态的热传递。从塑

料熔体到模具零件，进而到冷却系统的冷却液，不仅有热对流、热扩散和热辐射。还有以上四种“流体”之间界面的和塑料熔体内的运动和摩擦，将产生新的热量，并加入参与原先的热传递中。

4）复杂的流动现象。在模具型腔的充填过程中，塑料熔体的不同位置因不均匀的流速和温度分布有不同流变特性，如PVT数据和力学性能等。在塑料熔体中流变特性和材料性能变化进一步影响流动现象，进而影响其他物理现象。对厚壁注射件的模塑会有一些湍流、涡流和涡旋。流行的CAE中所有的模塑参数是在薄的间隙模式下的塑料熔体流动获得数值分析的结果。显然，此假设与厚壁模塑状态有矛盾。

5）控制质量的困难。在模塑过程中，各种物理现象最终都会影响制件的质量。模塑质量对各种物理现象及它们的组合作用很敏感。它们共同作用的结果，最终在模塑件上产生许多质量问题，如残余应力、收缩、翘曲、流痕、熔合缝和气囊等。对所有这些质量问题的控制和限制是困难的。

对高度逼真的充模模拟而言，发展中的各种模式要模拟上述的各种现象的问题是很难解决的。要全部模拟所有以上同时发生的瞬时现象，并考虑它们各自的影响是极端困难的，或许是不可能的。在这些复杂的物理现象和它们的影响完全搞清之前，深入的研究仍需进行。

另一方面，模塑过程变得越加复杂。新的模塑工艺、新的和混合材料、模塑件的形状更复杂和体积更大等，将使模型比以往更加复杂。以采用二级注射为例[19]，这种模塑过程的模式和模拟将最具挑战性。第一次注射可采用普通注射件模式，第二次注射则必须用原先凝固模式。混合的模具材料中，一种是良导体；另一种是优良的绝缘体，这是个不单纯的问题。第一次注射被保持在模具里，而此时模具的型腔有热量输出。要采用诸如模具和它的零部件各向同性属性的假设。否定这些假设将使所有这些模式越加复杂。另一方面，从材料的角度需要描述塑料性能的数据必须准确。通常，这些数据是从供应商那里得到的。然而，他们的数据往往不是最好的。此外，在模塑过程中材料添加剂会大大影响聚合物的属性。模塑企业从各个混合料的生产厂商处购得这些添加剂。计算和估测这些添加剂对基体材料物理性能的改性是困难的[29]。如果CAE模拟和分析只基于基体材料的性能数据，最终结果将令人怀疑。以上陈述的难题，也对CAE应用的发展提出了发展目标。

现代先进的计算机技术和软件技术的发展，足以在技术上支持高端领域的模拟，分析模塑过程中上述的物理现象，进行后置的模塑加工，应对在模具设计中应用CAE的挑战。目前实际问题是模式简单化及过程的复杂化。要简化模式，假设是需要的。虽然CAE工具提供了量化处理的结果，将来CAE的最终结果应更多在于质量分析。对注射制品设计师、模具制造者和模塑工艺师来说，CAE

模拟技术是极有价值的工具。使用 CAE 工具的工程师在制品、模具和工艺设计中应该充分认识到 CAE 工具的弱点和限制。这对于从事 CAE 分析工作，正确对待模拟结果来说，是很关键的。

5.7 综述

在注射模塑领域中，CAE、CAD 和 CAM 是三项重要的技术。CAD 技术以电子数据表述设计并使设计自动化。CAM 帮助实现设计的物质化，解决设计中的各种制造问题。本章首先总结了 CAE 在模具设计方面的应用成果。CAE 应用在注射制品设计、模具设计、成型工艺确定和制品质量四个方面对人们有所帮助。其次，又阐述了 CAE 分析的步骤和功能。在模具开发的生命期中，CAE 在设计过程中的作用是明确清晰的。为了说明这项技术的实际应用，本章还对两个实例进行研究。它们分别是注射模设计的冷却分析和压铸模设计的铸造过程模拟。在本章最后，还总结了 CAE 技术在模具设计方面应用的局限性及其面临的挑战。

参考文献

[1] M.W. Fu, J.Y.H. Fuh and A.Y.C. Nee, "A core and cavity generation method in injection mold design", International J of Production Research, Vol. 39, No.1, pp.121-138, 2001.

[2] V. Travaglini, "Optimizing part and mold design using CAE technology", Proceeding of ANTEC'1998, pp.36-40.

[3] Advanced CAE Technology, Inc., "C-MOLD reactive molding user's guide", on-line documentation, 1997, http://www.scudc.scu.edu/cmdoc/re_doc/06_log.frm.html.

[4] Moldflow Corporation, "Moldflow Plastics Advisers™ design-for-manufacture analyses: Solutions for part designers", on-line documentation, 2000, http://ni.bitpipe.com/-detail/RES/997269894_183.html.

[5] Moldflow Corporation, "Moldflow Plastics Advisers™ design-for-manufacture analyses: Solutions for mold designers", on-line documentation, 2000, http://ni.bitpipe.com/-detail/RES/997270202_871.html.

[6] B.H. Kim and M.C. Ramesh, "Automatic runner balancing of injection molds using follow simulation", J of Engineering for Industry, Vol. 117, pp.508-515, 1995.

[7] C.C. Lee and J.F. Stevenson, "Runner design with minimum volume for multicavity injection molds: Part 1: Runner sizing, Proceeding of ANTEC'1997, pp.376-382.

[8] C.C. Lee, "Runner design with minimum volume for multi-cavity injection molds: Part 2: Runner layout, Proceeding of ANTEC'1997, pp.382-387.

[9] B.H. Lee and B.H. Kim, "Automated design for the runner system of injection molds based on packing simulation, Proceeding of ANTEC'1996, pp.708-713.

[10] B.H. Lee and B.H. Kim, "Automated selection of gate location based in designed quality of injection molded part", Proceeding of ANTEC'1995, pp.554-560.

[11] K. Himasekhar, K.J. Lottey and K.K. Wang, "CAE of mold cooling in injection molding using a three-dimensional numerical simulation", ASME J of Engineering for Industry, Vol. 114, pp.213-221, 1992.

[12] K.J. Singh, "Design of mold cooling system", Injection and Compression Molding Fundamentals, A.I. Isayev, ed., Marcel Dekker, New York, 1987, pp. 567-605.

[13] L.Q. Tang, K. Pochiraju, C. Chassapis and S. Manoochehri, "A computer-aided optimization approach for the design of injection mold cooling systems", ASME J of Mechanical Design, Vol. 102, pp.165-173, 1998.
[14] Moldflow Corporation, "Moldflow Plastics Xpert®, Process Automation and Control System", on-line documentation, 2001, http://www.moldflow.com/pdf/mpx/mpx_white paper.pdf
[15] S.L. Mok, C.K. Kwong and W.S. Lau, "An intelligent hybrid system for initial process parameter setting of injection molding", International J. of Production Research, Vol.38, pp.4565-4576, 2000.
[16] H.H. Chiang, K. Himaskhar, N. Santhanam and K.K. Wang, "Integrated simulation of fluid flow and heat transfer in injection molding for the prediction of shrinkage and warpage", J of Engineering Materials and Technology, Vol. 115, pp.37-47, 1993.
[17] B.H. Lee, "Optimization of part wall thickness to reduce warpage in injection molded part based on the modified complex method", Proceeding of ANTEC'1996, pp.692-697.
[18] A.G. Bakelite, "Defects on molded parts", developed by Paul Thienel, Bernhard Hoster and Christian Kurten, On-line documents, 2003, http://www.bakelite.de/eng/pdf/kvl-pt2.pdf.
[19] Y.F. Sun, K.S. Lee, C.H. Tan and A.Y.C. Nee, "The comparison between finite element analysis and experimental results of the cooling of injection molds with hot runner system", Proceedings of the 10th Manufacturing Conference in China, 10-12 October 2002, Xiamen, China.
[20] R.W. Jeppson, Analysis of flow in pipe networks, Butterworth Publishers, UK, 1976.
[21] N. Ahmad, H. Combeau, J.L. Desbiolles, T. Jalanti, G. Lesoult, J. Rappaz, M. Rappaz and C. Stomp, "Numerical simulation of macro-segregation: a comparison between finite volume method and finite element method predictions and a confrontation with experiments", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 29A, pp.617-630, 1998.
[22] M. Rappaz, C.A. Gandin, J.L. Desbiolles and P. Thevoz, "Prediction of grain structures in various solidification processes", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 27A, pp.695-705, 1996.
[23] C.A. Gandin, J.L. Desbiolles, M. Rappaz, and P. Thevoz, "A three-dimension cellular automation-finite element model for the prediction of solidification grain structures", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 30A, pp.3153-3165, 1999.
[24] K. Davey, S. Hindula and L.D. Clark, "Optimization for boiling heat transfer determination and enhancement in pressure die casting", ed. by A.Y.C. Nee, Special Issue on Molds and Dies, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Vol. 216, pp.1589-1609, 2002.
[25] B.H. Hu, K.K. Tong, C.M. Choy, T. Muramatsu and S.X. Zhang, "State-of-the-art casting and forging technologies for industry", Material Technology and Advanced Performance Materials, Vol.17, No.4, pp.217-223, 2002.
[26] J.C. Gelin, T. Barriere and B. Liu, "Improved mold design in metal injection molding by combination of numerical simulations and experiments", ed. by A.Y.C. Nee, Special Issue on Molds and Dies, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Vol. 216, pp.1533-1547, 2002.
[27] D. Kothe, D. Juric, K. Lam and B. Lally, "Numerical recipes for mold filling simulation", The Proceedings of the 8th International Conferences on Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Process, 1998, San Diego, CA.
[28] T.A. Osswald and P.J. Gramann, "Polymer processing simulations trends", On-line documentation, 2003, http://www.madisongroup.com/Publications/PPtrends.pdf.
[29] G. Engelstein, "Misuse and abuse of plastic process simulation", Proceeding of ANTEC'1994, pp.520-523.

第6章　计算机辅助注射模具与压铸模具制造

6.1　概述

本章中将塑料注射模和金属压铸模，简称为模具。模具的几何成型零部件，如型芯和型腔等通常都是空间曲面。从传统意义上讲，模具上空间曲面的加工通常由仿形铣削完成。然而，由于切削刀具的工作条件不甚理想，这种加工方法会导致刀具发生位置偏移，从而降低加工精度。相反，计算机数控铣削加工 CNC 和电火花加工 EDM 是注射模和压铸模制造过程中两种最为重要的加工方法。一般情况下，模具加工首先是由效率更高的 CNC 机床完成的。当模具的有些部位结构比较复杂，或者其材料很难加工时，用铣削加工比较困难。此时就可用电火花加工 EDM 使加工得以实现。

计算机数控机床的工作效率是通过其核心指令，刀具加工路径的有效性来体现的。因此，刀具加工路径的生成在工件制造过程中是相当重要的环节。在过去的十几年中，数控刀具的加工路径生成已取得了相当大的突破。与此同时，数百种 CAM 造软件系统也应运而生。但是，人工选择刀具和设置切削参数仍然有其存在的必要性。除此之外，模具的外形尺寸可能非常复杂，为了能加工出完整的工件，需要大量的电极。因此，电极的设计成为非常耗时和繁琐的工作。所以，模具制造业真正需要的是能对模具的工件数据进行分析，自动设置加工参数、选择切削刀具、设计电极，并能自动或半自动地生成刀具加工路径的 CAM 系统。

如图 6-1 所示，模具制造可以被分为 6 个阶段：规划工艺过程、计算机数控加工 CNC、电极加工、电火花加工 EDM 以及表面处理。在工艺规划过程中，需要对工件几何外形尺寸、毛坯尺寸、机床功能及切削刀具等进行研究。同时，还需对 CNC 机床和 EDM 机床、切削刀具和加工参数等进行规划。由于受到工件轮廓形状和深度的限制，复杂模具的制造加工过程一般是由粗加工和精加工两部分组成。粗加工是为了去除毛坯表面的多余材料。而精加工在粗加工之后，沿着工件表面去除余留的材料，使工件满足规定尺寸公差和光洁的表面要求。通常，粗加工由 CNC 铣削加工完成，而精加工则采用 CNC 或 EDM，或者这两者的组合方式进行。要综合考虑缩短模具生产周期、降低成本、提高加工工艺柔性及提高制品质量等各种因素来进行选择。

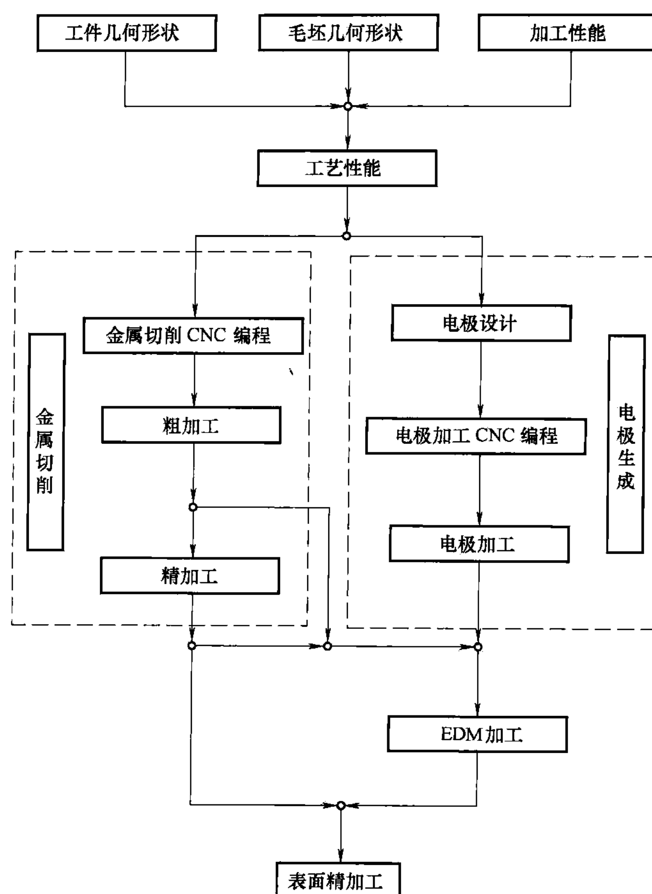


图6-1 模具加工工艺过程

为了缩短制品设计和制造的时间，许多公司在注射件还没有完全确定时就开始模具设计和制造了。当制品设计需要改进时，模具的设计、制造也需要进行相应的修改。在实际生产过程中，如果在刀具路径计算完成后再修改注射模或压铸模的设计，修改的部分相对整个模具来说是相当少的，但还要为整个工件重新生成刀具路径。这样非常不利于制品生产，而且也很耗时。本章将提出一种新的很有用的刀具路径再生方法，它能利用已生成的闭环刀具定位点来对模具设计进行修改。本章将用大量的实例和数据，对其进行说明。

6.2 模具加工过程的干涉检测

在CNC刀具路径生成和切削刀具的选择过程中，至关重要的干涉检测问题，

许多研究者都对此进行过研究。在简化干涉检测的数学成果没有出台前，大多数都是从刀具生成的角度进行干涉检测研究。由此得到的方法很难在复杂的模具加工过程中使用。Choi 等人[1]已经提出了空间雕塑曲面的三轴加工方法所需要的数学基础。

本节将对干涉检测的新方法进行阐述。这种方法将根据工件表面的形状对干涉进行分析和分类。干涉位置可用刀具的鞍形表面与凹形面的极限曲率值的比较来测出。球面干涉可由表面边界测出，而非干涉边界围绕的区域，也被证明是非干涉球面。这种检测球面干涉的理论已被提出和证实。使用这种方法，可以不用对表面或曲面的偏置值或对刀具路径进行计算就能有效地检测出表面干涉。

6.2.1　切削加工中的干涉

根据加工工件的轮廓形状，如图 6-2 所示，将加工干涉分为三种类型：图 6-2a的曲率干涉、图 6-2b 的瓶颈干涉和图 6-2c 所示深槽干涉。其中，当加工表面曲率值比刀具的曲率大时，将会在相关位置产生曲率干涉。当加工偏置表面上的点和其他表面上的点之间的距离比刀具半径小时，就会产生瓶颈干涉，也称球面干涉。当表面轮廓深度比刀具的长度大时，则会产生深槽干涉。

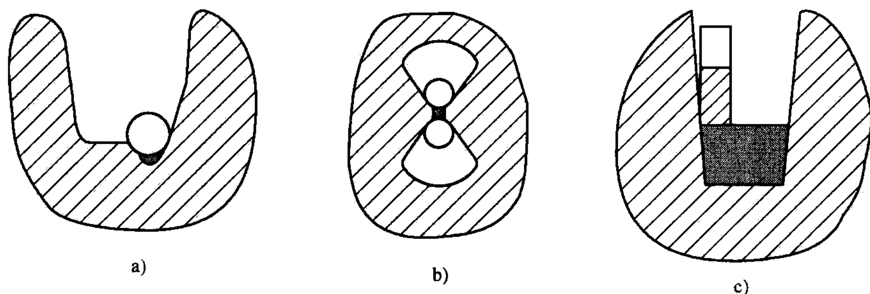


图 6-2　加工干涉的三种类型
a）曲率干涉　b）瓶颈干涉　c）深槽干涉

在这三种干涉中，深槽干涉通过刀具长度与轮廓深度的比较，可容易测出。因此，在本节中仅对干涉位置和球面干涉进行研究。具有雕塑曲面的复杂模具的加工中，球头立式铣刀在精加工中应用最为广泛，所以干涉检测也主要针对球头立铣刀进行。

6.2.2　干涉的检测方法

根据刀具路径生成的方法，干涉检测可以分为五种类型：曲线偏置法、表面偏置法、刀具接触点（CC-point）和 z 向映象（Z-map）方法、多面体方法及直接检测方法。

1. 曲线偏置方法

曲线偏置方法通常用在袋状表面加工过程中。通过这种方法，工件被切成与z轴垂直的一些平面，同时生成一系列曲线，刀具的路径就在这些相贯的曲线上产生。偏置曲线的定义为轮廓母线上单元法向矢量的跟踪点的轨迹，是具有偏置距离的并行曲线[2]。当平面轮廓加工完后，刀具中心路径就是由刀具半径R通过轮廓的偏置曲线。用曲线偏置方法生成刀具路径的过程中，仅在各偏置曲线间存在相交或自相交时，才会出现干涉。因此，对曲线偏置的干涉检测方法就是找出偏置曲线的相交或自相交。

如图6-3所示，存在四种可能出现的偏置曲线相交的类型。第一种是当偏置曲线的曲率半径小于刀具的半径时，如图6-3a所示，将出现曲线自相交。第二种是袋状曲线相交的两个偏置曲线，如图6-3b所示。这种情况出现在两曲线间的距离小于偏置距离的两倍的时候，从而形成一个“8”字型。第三种是袋状偏置曲面线与岛状偏置曲线相交，如图6-3c所示。第四种是两个岛状的偏置曲线相交，如图6-3d所示。在袋状轮廓的刀具路径生成过程中，偏置曲线相交为环状形式。因此，检测干涉环是曲线偏置方法中最为重要的问题。

Tiller和Hanson[3]是干涉问题的第一批研究者。他们研究提出了一套去除岛状干涉环的运算法则。通过这套运算法则，封闭环的自交点可以率先测出。然后偏置曲线在交点处分开，去除干涉环后就可生成刀具的加工路径了。

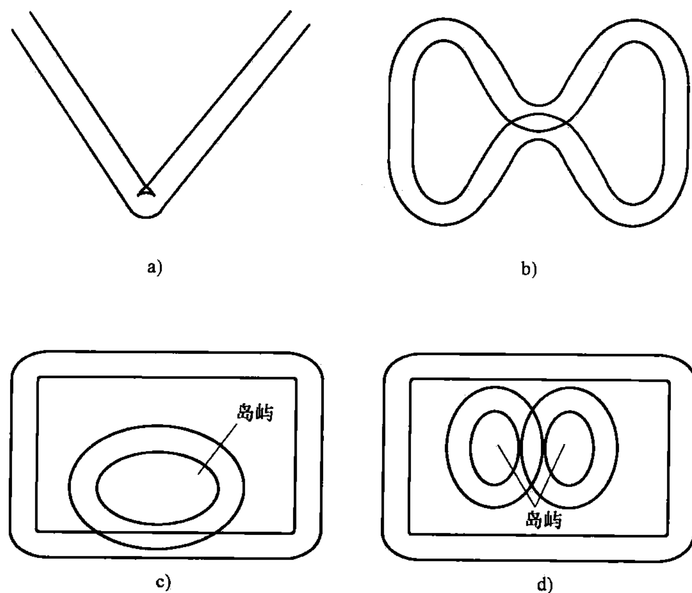


图6-3　二维干涉的四种类型

在检测干涉环的过程中，决定工件干涉环的种类是具有难度的。尤其是当袋状曲线中含有岛状曲线时。如图6-4a所示的两个封闭环L_1和L_2，封闭环L_1并没有引起干涉，所以应该是刀具路径的最终部分；封闭环L_2引起了干涉，因此应该被去除。Suh和Lee[4]为了解决这个问题，将各个偏置环按顺时针次序布置。刀具路径由下一个封闭环曲线产生，直到在交点相遇。大多数情况下，这种具有识别能力的技术能取得非常令人满意的效果。但当出现内嵌环时就会出问题，在这种情况下偏置路径与封闭环相交，从而对工件产生干涉，如图6-5所示。

Hansen和Arbab[5]通过寻找封闭环相交点的干涉指数来解决这类问题。该法要先找到所有的偏置链相交处，随后各偏置曲线就会在相交处分开。只要链的指数被识别，其中的干涉链就可去除。由于在每个相交处所有易于生成的链的干涉指数是一样的，所以可只对其中一个链建立干涉指数。

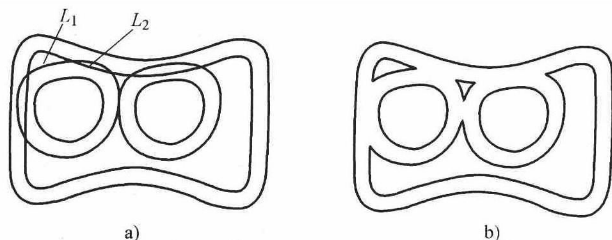


图6-4 干涉与非干涉偏置
a）干涉环的偏置 b）免除偏置干涉

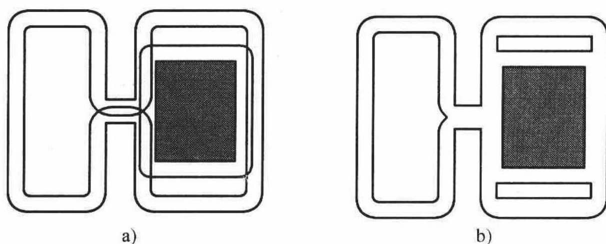


图6-5 “嵌入环”干涉
a）“嵌入环”偏置 b）非干涉的偏置

曲线偏置方法被广泛运用于只有二维的刀具路径被设计的粗加工。这种刀具路径的干涉检测相当简单。这种方法的缺点是除平面立式铣刀外，很难为其他刀具生成加工路径。用其他刀具加工时，切削刀具的切削点会随着加工面斜度的改变而改变，同时刀具的有效半径也会改变，从而使得曲线偏置的计算变得相当困难。这种方法的另一个缺点就是很难控制表面的粗糙度。此表面与随后分开的平面之间的高度有关系。此外，这种方法需要对相交曲线进行计算，这是相当耗时

的工作。

2. 表面偏置方法

表面偏置方法通常用于使用球头立式铣刀加工雕塑曲面。偏置表面就是每个点和原表面之间距离与加工刀具半径相同的面[6]，偏置表面上的点就是刀具的中心。在使用这种方法时，先算出偏置表面，然后将产生干涉的那部分去除。

在检测干涉的过程中，关键问题是从偏置曲线中识别相交和自相交。许多研究工作者[7,8,9,10]都对这个问题进行过研究。从偏置表面中计算出相交面和自交面是非常复杂和耗时的，因此，只有少数的研究者[11,12]通过识别相交面和自交面来直接检测干涉。为了避免计算偏置表面的干涉，大多数研究者通过平面与偏置表面相交产生平面曲线来进行干涉检测。

Lai 和 Wang[13]通过使用表面偏置的方法来生成刀具路径。在他们的方法中，偏置表面是最先生成的，随后由偏置表面和平面的相交产生平面刀具路径。干涉的检测则是通过对平面刀具路径的识别来实现，如图 6-6 所示。由于从曲线中识别干涉较为容易，所以这种方法也被 Seiler 等人[14]使用。然而，Seiler 等人指出，如果检测是从干涉点开始的话，容易遗漏干涉区域。因此，必须使用其他方法来检测边界点。

Tang 等人[15]研究出一种既对内部表面又对沿表面边缘的干涉进行检测的表面偏置的方法。在他们的方法中，最先生成偏置表面和表面边界的曲线，然后与 z 轴平行的平面偏置相交，非干涉的刀具路径由相交曲面的上包络线生成。通过对沿偏置表面边界的干涉进行检测，由不连续的 G^1（表面法向矢量）产生的干涉或者表面间隙均可被测出间隙，如图 6-7 所示。

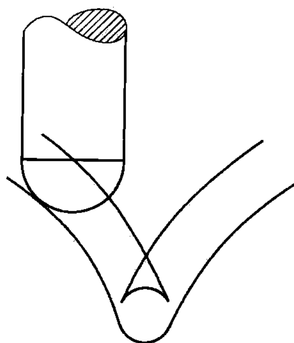


图 6-6　由偏置环引起的干涉

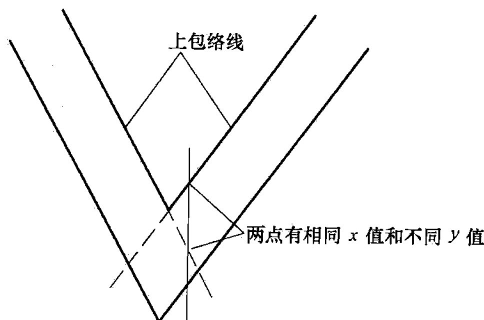


图 6-7　从偏置的上包络线生成的刀具路径

使用表面偏置方法，由于偏置表面可以精确算出，因此容易控制加工精度，同时也能控制加工表面的扇形高度。然而，这种方法需要计算表面偏置并检测可

能的相交和自相交的偏置表面，这是非常耗时的。此外，对于球头立式铣刀之外的其他刀具的偏置表面计算是非常困难的，而这些类型刀具的干涉检测更加麻烦。

3. 刀具接触点和 z 向映象方法

刀具接触点 CC-point（cutter contact point）方法可用于多种刀具类型。这种方法是在复合表面上设计一系列的刀具接触点，当偏置沿着表面的法向矢量时所有的刀具接触点要补偿刀具尺寸的影响，也要求得到刀具终点位置，称其为刀具定位点 CL（cutter location）。去除干涉的定位点，就可计算出刀具的最终路径。

Choi 和 Jun[16]首先取得了 CC-point 刀具路径生成时干涉检测系统的研究成果。在他们的研究中，先是将刀具接触点转换成三角形网格，然后通过对刀具中心和网格小平面之间距离的计算检测出干涉。一般情况下，CC-point 是非常高效的计算方法，并可以直接识别出干涉区域。但是刀具接触数据不同于 CL 数据，这种方法很难被用于已经定义了刀具路径的情况。例如，在进行粗加工铣削时，需要与刀具轴线垂直的平面刀具路径。这种问题可用 z 向映象方法（Z-map）方法解决。

Z-map 方法又称作为 z 向缓冲（Z-buffer）方法，与 CC-point 方法类似。Z-buffer 是 z 向坐标值的集合，由 xy 平面上的取样网点算出。它可以由表面的交点和通过取样网点的垂直线来得到。刀具路径可以通过使用偏置法的倒数从 Z-map 中生成。由于每个抽样点上的 z 轴最高值被作为 CL 点，因此最终刀具路径是抗干涉的。可以在参考文献［17，18，19］中找到这种抗干涉刀具路径的生成方法。

以上两种方法对球头或平面立式铣刀都可方便使用。其缺点是需要确定大量的点来满足加工公差，而且还需要通过广延计算来确定刀具位置。

4. 多面体表面方法

为避免复杂三维表面偏置计算，减少在 CC-point 和 Z-map 方法中附加点引起的计算，一些研究者应用多面体方法来生成刀具路径。采用这种方法，表面基本近似于一系列多面体的小平面，刀具定位点就是基于这些小平面生成的。通过去除干涉的 CL 点生成最终的刀具路径。

Duncan 和 Mair[20]通过运用一系列三角面来近似模型中的部分雕塑表面，同时得到每个三角面的确定公式。切削刀具在区域里是与多面体的表面相交的，刀具路径通过对切削刀具上 z 轴最高值的计算来确定。这样，就可以自动避免产生干涉了。

Hwang[21]、Hwang 和 Chang[22]将复合表面转换成一系列多面体。随后就从这些多面体的三角面上生成偏置表面。当偏置三角多面体重叠时，就会出现干涉。具有一系列垂直线的偏置表面相交时，偏置表面上的 z 轴最大值相交点就是非干

涉 CL 点。对两个非干涉刀具点之间切削误差的检测，可确认出原表面上的干涉区域。如果误差太大，则这两点之间的区域就是干涉区域。

由于计算刀具路径和识别平面干涉非常方便，多面体表面方法是非常可靠的。然而这种方法需要定义所有近似平面的公式。当需要高分辨近似表面时，数据量和计算时间将会急剧增加。此外，在表面近似过程中表面精度下降时，用这种方法生成的刀具路径准确度要比用偏置法生成的低。

5. 直接检测方法

以上所有检测干涉的方法，都是从刀具路径生成的角度出发的。使用这些方法只有等到偏置和刀具路径计算完成后才能得到干涉区域。如果所需刀具数量众多，将会耗费大量的计算时间。因此，将这些方法应用在复杂的模具制造上是存在一定的困难的。为了能解决这个问题，一些研究者直接从设计数据中检测干涉。

Yang 和 Han[23] 检测干涉有两个步骤。将表面曲率半径和刀具半径进行比较后先检测出曲率干涉，然后沿着曲率干涉区域的边界测出球面干涉。这种方法，可以不用生成刀具路径就能直接辨别出干涉区域。同时，在球体干涉检测过程中，也需要对大量的点进行检测。

Pottmann 等人[24] 和 Glaeser 等人[25] 从理论角度对干涉问题进行了研究。对局部干涉和偏置表面单一性之间的关系，以及与局部干涉相关的球体非干涉条件进行了深入的研究，并从理论上解决了一些干涉检测问题。但是，球体干涉检测的理论是在表面免除局部干涉的假设基础上建立的。此外，在他们的研究报告中并未提及干涉检测的运算法则。

6.3 三轴立式铣刀的干涉检测

综上所述，许多研究者都对干涉检测的问题进行过研究。他们大多数都是从刀具路径生成的角度或是基于曲线/曲面偏置来检测干涉的，这样做非常耗时。因此，必须研究关于雕塑曲面 3 轴加工的数学方法。

为了能使用球头立式铣刀加工表面，就要有避免局部干涉的条件，但这并不能保证避免在铣削时干涉。如在图 6-8 中，表面 $\boldsymbol{r}_1$、$\boldsymbol{r}_2$ 和 $\boldsymbol{r}_3$ 对于 C^1 连续，其中表面 $\boldsymbol{r}_1$ 和 $\boldsymbol{r}_3$ 是局部非干涉的，但这两个表面之间存在球体干涉。因此，就需要对局部和球体的干涉都进行检测。

接下来将介绍一种新的干涉检测方法[26]，如图 6-9 所示。该方法其有两个步骤：局部干涉检测和球体干涉检测。输入部分是工件的表面几何形状及切削刀具的尺寸，输出部分是检测干涉区域。

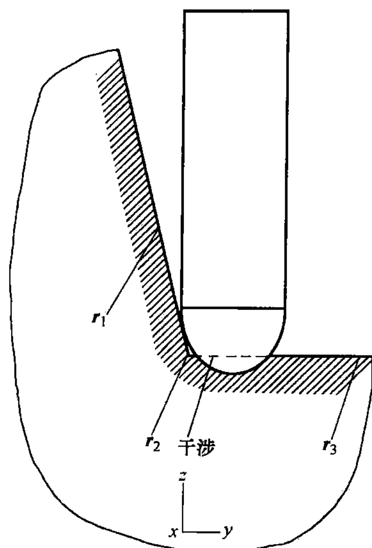


图 6-8 有球体干涉的两个局部非干涉表面

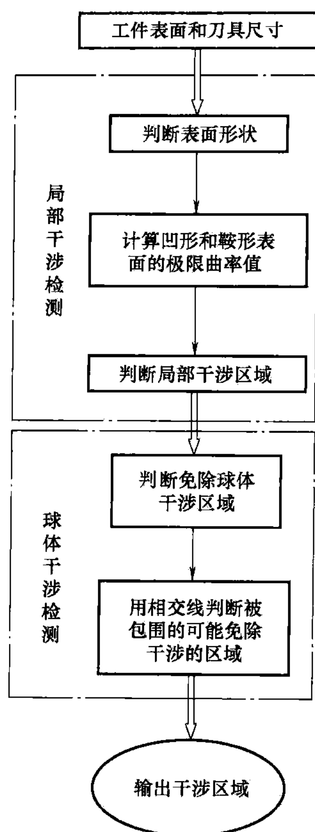


图 6-9 干涉检测过程

对于局部干涉检测最先识别的是表面形状，然后就可以对凹形和鞍形处的极限曲率值 k_{max} 和 k_{min} 进行计算。通过对表面极限曲率值与刀具的极限曲率值的比较，就可辨别出局部非干涉表面($k_{max} < (1/R)$)和存在局部干涉的表面($k_{min} > (1/R)$)。最后再识别处于极限曲率值之间($k_{max} > (1/R) > k_{min}$)表面的局部干涉区域边界。

接下来，为免除表面的局部干涉，要进行球体干涉区域的检测。检测从表面边界开始，如果表面边界上只有一些点是球体干涉点，就以表面边界的起始点来检测球体非干涉点的轨迹。可以检测由所有球体干涉点组成的边界及所包围的区域，从而识别出可能免除干涉的区域。下面介绍这种干涉检测的理论和运算法则。

6.3.1 局部干涉和球体干涉

在大多数情况下，机床加工都使用球头铣刀。本节将对进行 3 轴铣加工时局

部干涉和球体干涉的一些特征进行研究，并在干涉检测理论的基础上对干涉有效检测的运算法则进行介绍。研究者 Choi 和 Jun[16] 指出，仅在指定表面的最大理论曲率值比刀具半径大时才会出现局部干涉。由于在凸表面上不存在局部干涉，因此在表面形状确定后只需对凹形和鞍形表面进行检验。通过对凹形和鞍形表面的极限曲率值进行比较，很容易就能发现在表面上是否存在局部干涉。

如图 6-10 所示，$\boldsymbol{r}$ 是待测表面，$\boldsymbol{e}$ 代表所有的边界。$\boldsymbol{r}_0$ 是 $\boldsymbol{r}$ 的偏置面，$\boldsymbol{e}_0$ 则代表表面 $\boldsymbol{r}_0$ 所有的边界，其偏置距离与刀具的半径值 R 相同。$\boldsymbol{r}_i$ 代表 $\boldsymbol{r}$ 周围所有的表面，$\boldsymbol{r}$ 和 $\boldsymbol{r}_i$ 是 C^0 与分段 C^2 连续。假设所有表面的法向矢量都指向工件外面，刀具轴线 $\boldsymbol{T}$ 与 z 轴平行，令 $\boldsymbol{T}=(0,0,1)$。如果表面法向矢量 $\boldsymbol{n}$ 指向 z 轴的负方向，就不能使用 3 轴铣床加工表面。因此，假设所有表面的法向矢量都指向 z 轴的正方向，即 $(\boldsymbol{T}\cdot\boldsymbol{n})>0$。

当偏置表面 $\boldsymbol{r}_0$ 和表面 $\boldsymbol{r}_i$ 之间的距离小于刀具半径 R 时，就会出现球体干涉，因此球体干涉检测可作为距离问题。同时，也有一些对球体干涉检测的特性存在。Ding 等人[27] 证明了以下干涉检测理论。

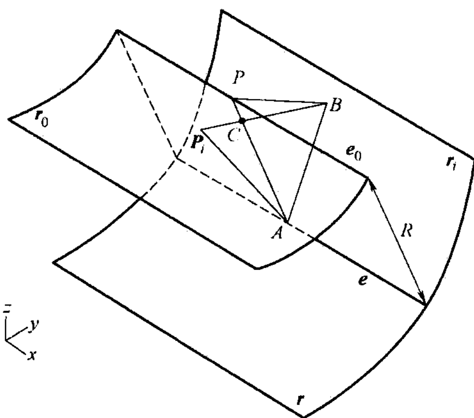


图 6-10　表面边界和偏置

1. 干涉检测理论

定理 1： $\boldsymbol{r}$ 是局部非干涉的表面，$\boldsymbol{r}_i$ 代表 $\boldsymbol{r}$ 周围的所有表面，$\boldsymbol{r}$ 和 $\boldsymbol{r}_i$ 是 C^0 与分段 C^2 连续。如果表面 $\boldsymbol{r}$ 边界上的所有点对表面 $\boldsymbol{r}_i$ 没有干涉，则表面 $\boldsymbol{r}$ 上的点也对表面 $\boldsymbol{r}_i$ 没有干涉。

Pottmann 等人[24] 对该理论的论证如下。

证明： 令 Φ 表面表述为函数 $z=f(x,y)$，而 C^0 与分段 C^2 的函数 $f: R^2\rightarrow R$。如果 Φ 的任何位置，都可用精确的凸面 C^0、分段 C^2 以及平行刀具轴 Σ 来局部铣削，则 Φ 就可用 Σ 球体铣削。

一般而言，球头立式铣刀的表面就是精确的凸面 C^0 与分段 C^2。由于 $\boldsymbol{r}$ 和 $\boldsymbol{r}_i$ 是 C^0 与分段 C^2 连续，因此就可用一个表面 Φ 来表示，其中 Φ 也是 C^0 与分段 C^2 连续的。如果表面 $\boldsymbol{r}_i$ 任意处局部非干涉，则表面 $\boldsymbol{r}$ 上不存在任何点与表面 $\boldsymbol{r}_i$ 干涉。

现在验证当表面 $\boldsymbol{r}_i$ 上有一个局部干涉区域时，此定理是否正确。假设一个在表面 $\boldsymbol{r}_{ib}$ 上滚动的球，其半径比刀具的半径稍微大些。如图 6-11 所示，在 $\boldsymbol{r}_i$ 的一侧生成球包络的新表面 $\boldsymbol{r}_n$。此表面是非干涉的，它位于原表面 $\boldsymbol{r}_i$ 的外侧。因此，如果表面 $\boldsymbol{r}$ 上存在一点与表面 $\boldsymbol{r}_i$ 干涉，则此点就将与表面 $\boldsymbol{r}_n$ 干涉。除了局

部干涉区域之外，表面 $\boldsymbol{r}_i$ 和表面 $\boldsymbol{r}_n$ 有相同的偏置面。实际过程中可以忽略由刀具半径的不同而产生的微小部分。因此，表面 $\boldsymbol{r}$ 上的所有点都不与表面 $\boldsymbol{r}_n$ 干涉。这样表面 $\boldsymbol{r}$ 和 $\boldsymbol{r}_n$ 都可由 C^0 和分段 C^2 连续的表面 $\boldsymbol{\Phi}$ 来表示，而且表面 $\boldsymbol{\Phi}$ 是球体非干涉的。

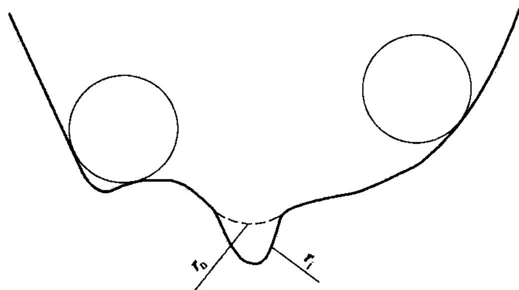


图 6-11 表面 r_n 和 r_i

所以，如果表面 $\boldsymbol{r}$ 边界上的所有点与平面 $\boldsymbol{r}_i$ 不存在干涉，则无论表面 $\boldsymbol{r}_i$ 中是否存有局部干涉区域，则表面 $\boldsymbol{r}$ 上的点都不与表面 $\boldsymbol{r}_i$ 干涉。运用这个理论，就可从表面的边界来检测球体干涉了。同时，还可对表面边界上的点进行检查，从而辨别出非干涉区域。这就为识别球体非干涉区域提供了有效的方法。如图 6-12 所示，由于表面 $\boldsymbol{r}$ 的边界上所有点都是球体非干涉的，因此可认为此表面也是球体非干涉的。

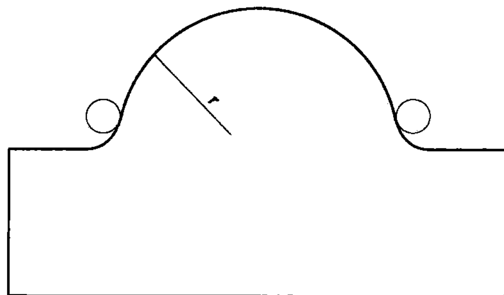


图 6-12 免除表面 r 干涉

定理 1 提供了球体非干涉的条件。下面的两个定理将研究被边界所包围的表面，在其上所有的点与其他表面都存有干涉。

推论： 表面 $\boldsymbol{r}$ 是局部非干涉的，$\boldsymbol{e}$ 是其边界，而 P 是偏置表面 $\boldsymbol{r}_0$ 上的点。$\boldsymbol{e}_p$ 和 P_p 分别是 $\boldsymbol{e}$ 和 P 在 xy 平面上的投影，如图 6-13 所示。如果 $\boldsymbol{e}_p$ 和 P_p 之间的最小距离比刀具的半径 R 大，则在表面 $\boldsymbol{r}$ 上与点 P 相应的点是球体非干涉的。

证明： 在 z 轴方向上延伸表面边界 $\boldsymbol{e}$，生成与 z 轴平行的圆柱面 $\boldsymbol{C}_y$，表面 $\boldsymbol{r}_i$ 是圆柱面 $\boldsymbol{C}_y$ 的外侧。由于点 P_p 和圆柱面 $\boldsymbol{C}_y$ 之间的距离大于 R，而点 P 和表面 $\boldsymbol{r}_i$ 之间的距离也大于 R，因此表面 $\boldsymbol{r}$ 上与点 P 相应的点是球体非干涉点。

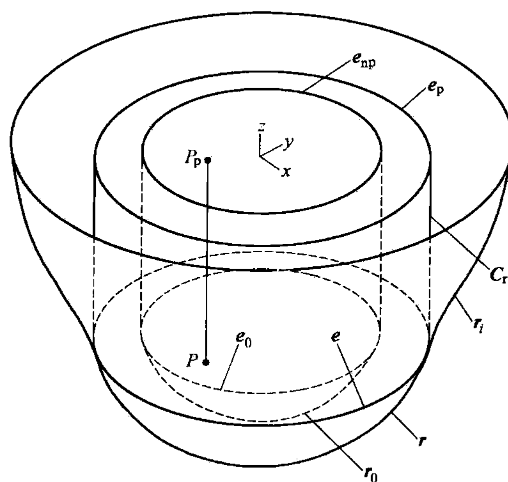


图 6-13 具有非干涉点的区域

实际上，并不能总是简单地判断出点 P_p 是否在偏置表面 r_0 的投影内。下面的定理可说明，如果该点在表面 r 的投影内，则也会在表面上存在非干涉点。

定理2：表面 r 是局部非干涉的，P 是表面 r 上的一点，e 表示所有的边界。P_p 和 e_p 分别是 xy 平面上 P 和 e 的投影，如果 P_p 和 e_p 之间的距离比刀具半径 R 大，则点 P 是球体非干涉。

证明：令 r_p 为表面 r 的投影，r_{0p}是偏置表面 r_0 的投影。由定理1的推论可知，如果 P_p 在平面 r_{0p}内，点 P 就是球体非干涉点。假设 P_p 点在平面 r_{0p}外，同时在 e_0 和 e_p 之间，由于平面 r 是局部非干涉的，且 P_p 和 e_p 之间的距离不能比刀具半径 R 大，因此点 P_p 只可能在平面 r_{0p}内，而点 P 则是非干涉点。

定理2提供了一种对所有球体干涉点在被边界包围的表面上识别免除球体干涉可能的方法。由于这是个二维问题，因此较容易识别非干涉点。只要能找到非干涉点，就能由此点来检测出球体非干涉区域。

定理3：r_1 和 r_2 是关于 C^1 连续的表面，而且都是局部非干涉表面。在同一或不同的表面上，由于表面 r_1 和 r_2 上任意两个表面的法向矢量 n_1 和 n_2，有 $(n_1 \cdot n_2) \neq 0$，并且两表面上法线不平行。如果表面 r_1 边界上的所有点与表面 r_2 球体干涉，则表面 r_1 上所有点都与表面 r_2 球体干涉。

Sederberg 等人[28]对此定理的论证如下。

证明：*两个非单独表面 S_1 和 S_2 的碎片在封闭环 C 内相交，如满足以下条件则存在一条直线同时与平面 S_1 和 S_2 垂直。*

1）任意两个法向矢量的点积不为零（在相同碎片或不同碎片上）。

2）S_1 和 S_2 上任意处的切线连续。

令 r_{01}和 r_{02}分别在偏置面 r_1 和 r_2 上，由于 r_1 和 r_2 是局部非干涉，r_{01}和 r_{02}的法向矢量与 r_1 和 r_2 相应点上的相同，且也与 r_1 和 r_2 对 C^1 连续。由于表面 r_1 边界上的所有点都与表面 r_2 球体干涉，如果表面 r_1 内存在球体非干涉区域，则偏置面 r_{01}和 r_{02}将相交形成封闭环。又因为任意两个表面上法向矢量的点积不为零 $(n_1 \cdot n_2) \neq 0$，并且两表面内的表面法线不会平行，表面 r_{01}和 r_{02}就不可能相交，形成封闭环。因此表面 r_1 内就不存在非干涉区域，而且上面的每个点都与表面 r_2 干涉。

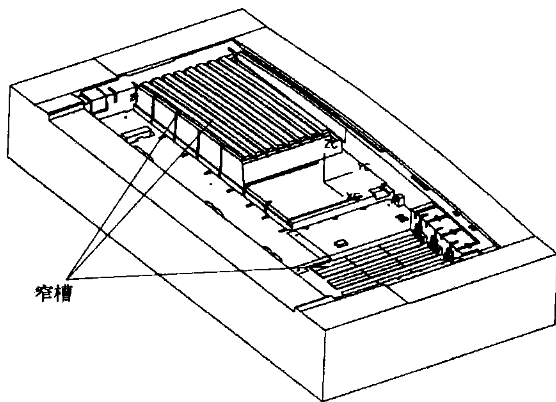


图6-14 成型塑料件的肋条在模具里形成窄槽

在塑料成型模具中，塑料制品的加强肋会形成大量的窄槽，如图6-14所示。

大部分的加强肋的表面是平面。这些表面通常会有脱模斜度以便于模具加工，很容易辨别出窄槽的两相对面满足定理3的条件。如果边界上的所有点与其相对面干涉，就可断定这些表面为完全干涉区域。

2. 干涉检测的运算法则

在干涉检测理论的基础上，发展了干涉检测的运算法则。球体干涉检测的定理都是以被测表面为局部非干涉的设想为基础的。因此，局部干涉最先测出，而球体干涉则是在局部非干涉面中检测到的。

（1）局部干涉检测

局部干涉是通过对表面的极限曲率与刀具的半径比较后检测到的。由于在凸表面上不存在局部干涉，因此可先测出表面形状，只需识辨凹形和鞍形表面的极限曲率即可。表面上的任意点都有两个理论曲率值 k_1 和 k_2。在局部干涉检测中，只需考虑较大的那个 k 值，简化为公式

$$k_1 = K_m + \sqrt{K_m^2 - K_g} \tag{6-1}$$

式中 K_m——表面平均曲率；

K_g——高斯曲率。令 k_{max} 为 k_1 的最大值，k_{min} 为 k_1 最小值，R 为刀具的半径，如果 $k_{max} < (1/R)$，则整个表面不存在局部干涉。如果 $k_{miin} > (1/R)$，则表面上的每个点都是局部干涉点。如果 $k_{min} < (1/R) < k_{max}$，其中的一些点是干涉点，则其余为非干涉点。通过分辨 k_{max} 和 k_{min} 值，就可直接辨别出表面是否存在干涉。在调研多个刀具和选定刀具时可缩短检测时间。

表面形状识辨和局部干涉检测，其算法的编码如下。

```
LI(S,R,SI,SN)
/* 定义工件所有平面 S 和刀具半径 R,鉴别局部干涉(SI)和非干涉平面(SN)
*/
  {
  for (i=0;i<number_of_S;i++)
     {sample(m×n)grip points for surface S(i) and calculate matries of E,F,G
      and L,M,N;
     identify the convex/concave/saddle regions with K and Km;
     calculate kmax and kmin in concave and saddle regions;
     if (kmin >1/R)                /* 区域内的每点是局部干涉点   */
  SI⇐S(i);
  else if (kmax <1/R)            /* 表面为局部非干涉   */
  SN⇐S(i);
  else{
       identify the boundary of local interference region;
```

```
        trim the surface along the boundary of local interference region;
        SI⇐interference region;
        SN⇐non-interference region;
}}}
```

在局部干涉检测中，先对表面上的点进行取样，然后算出点 L、M 和 N 的值。取样点的数量由所需精度来决定。取样点越多，则检测精度就越高。高斯曲率 K_g 的符号与 $K(=(LN-M^2))$[29]的一样。计算出 K 值后，就可以辨别出马鞍形状（$K<0$），同时还可用区域（$K\geqslant 0$）内的平均曲率 K_m 来判断出凹形和凸形表面。

然而，算出凹形和鞍形表面的 k_1 值后，这些区域内 k_1 的最大值（k_{max}）和最小值（k_{min}）也可分别判断。对 k_{max} 和 k_{min} 值与（$1/R$）的比较，还能辨别出局部干涉和无干涉区域。表面上有一系列点被取样，取样数量则由所给的公差决定。计算出这些点的最重要曲率值，通过对干涉区域的曲率值与刀具半径的比较来判断局部干涉区域。确定干涉区域时要沿局部干涉区域边界来调整表面。所有干涉表面都储存在 **SI** 内，无干涉平面储存在 **SN** 内，然后就可检测出 **SN** 平面的整体干涉了。

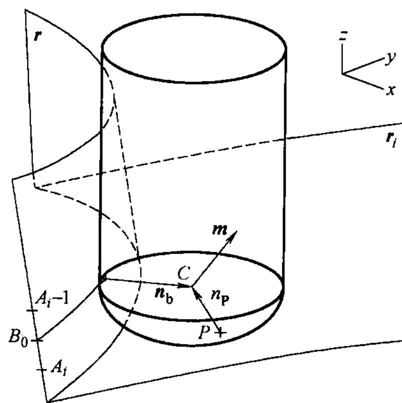


图 6-15　搜索点 B_j

（2）球体干涉检测

如图 6-15 所示，在球体干涉特性的基础上，球体干涉检测的算法及编码如下。

```
GI(SN,S,R,SG)
/*给出局部非干涉表面(SN)、所有加工表面(S)和刀具半径 R。判别表面 SG 在边界上所有点是否是球体干涉的点*/
{
    for(i=0;i<number_of_SN;i++){
    for (j=0;j<boundary_number_of_SN(i);j++){
        sample m points A[m] on boundary(j);
        for (k=0;k<m;k++){
            n⇐(normalized surface normal at point A(k));
            C(k)=A(k)+R·n;      /*计算刀具中心点 C*/
        d(k)=1000;      /*计算点 C(k)和所有其他表面间的最小距离*/
```

```
        for (l=0;l<number_of_S:l++){
           if(SN(i)≠S(l)){
                    d0⇐minimum distance of point C(k) with surface S(l)
                    if (d0 <d(k))
                         d(k)=d0;
           }}
           if(d(k)>R){
               if(d(k-1)>R)
                    detect the next point;
               else
                    call BD (A(k-1),A(k),SN(i),SG);
                  /* 寻找非干涉点的轨迹 */
           }
               else{
                    if(d(k-1)<R)
                         detect the next point;
                    else
                         call BD (A(k-1),A(k),SN(i),SG);
           }}}
             if(all points on surface boundaries are global interference points)
               SG⇐SN(i);
}}
```

在球体干涉检测中，由所给公差对局部非干涉边界点进行取样。对于每个取样点，计算出刀具中心点 C_k，再算出 C_k 点与所有其他表面之间的最小距离 d_k。需指出，测出的距离是个近似值，并且可用 CAD/CAM 系统功能来进行检测。如果表面边界上的点都是球体非干涉点，则整个平面也为非干涉面。如果表面边界上的所有点与其他表面有干涉，则要用运算系统 *NGI* 进一步研究该表面。如果表面边界上只有一些点与其他表面干涉，则要用运算系统 *BD* 来对球体干涉区域边界进行研究，具体编码如下。

```
BD(A0,A1,SNK,SG,S)
 /* 给定 A0 和 A1 两点为表面 SNK 边界 e 在不同干涉条件下的点。定义工件的
所有表面 S,检测被球体干涉点包围的区域 SG */
   {
      B(0)⇐Start_point(A0,A1,SNK,S);
               /* 命名子函数 Start_point 来找出点 B(0),它在隔开干涉和无干
```

涉区域的两点 A_0 和 A_1 之间 */

```
n_b⇐(normalized surface normal vector at point B(0));
C(0) = B(0) + R · n_b;          /* 计算刀具中心点 */
i = 0;
do{
        /* 找出点 P 和与点 C(0)距离为 R 的表面 r_i 上的表面法向 n_p */
   if(S (i) ≠ SNK){
        d⇐(minimum distance between point C(0) and surface S(i));
        if((d > (R - ε))&&(d < (R + ε))){
          P⇐(the point on surface S(i) that the distance with point C(0)
             equals R);
          n_p⇐(surface normal at point P of S (i) at point P);
        }
        else
             i ++;
     }}while(((d < (R - ε))or(d > (R + ε)))&&(i < number_of_S));
     j = 0;
     do{  /* 检测隔开干涉和无干涉区域的点 */
          C(j) = B(j) + R · n_b;
     m⇐(n_b × n_p);
                   /* 计算刀具中心点的检索矢量 */
        C(j + 1) = C(j) + l · m;/* 搜寻下个刀具中心点 */
        d⇐(minimum distance between C(j + 1)and SNK);
        if((d > (R + ε))or(d < (R - ε)))
           shortenl, until C(j + 1) is in the tolerance;
           B(j + 1) = C(j + 1) - R · n_b;/* 干涉区域边界上的点 */
           j ++;
           if(B (j + 1) reaches to surface boundary)
               search along surface boundary;
        }while(B(j + 1)has no reached to point B(0));
        Trim surface SNK along the detected boundary;
        SG⇐interference region;
     }
```

如果表面边界上的两点 A_0 和 A_1 改变了干涉条件，如图 6-15 所示，可先判断出分隔干涉和无干涉点边界上的点 B_0。再以点 B_0，识别点 P 和在表面 S_i 上相

应的表面法向 $\boldsymbol{n}_{\mathrm{p}}$。其表面 S_i 与点 C_0 间的最小距离为 R。再根据 $\boldsymbol{n}_{\mathrm{p}}$ 和点 B_0 上 ***SNK*** 的表面法向 $\boldsymbol{n}_{\mathrm{b}}$，按下面公式计算出检索矢量 $\boldsymbol{m}$

$$\boldsymbol{m} = \pm \frac{\boldsymbol{n}_{\mathrm{b}} \times \boldsymbol{n}_{\mathrm{p}}}{|\boldsymbol{n}_{\mathrm{b}} \times \boldsymbol{n}_{\mathrm{p}}|} \tag{6-2}$$

其中，$\boldsymbol{m}$ 的符号取决于之前搜索点，如果 $\boldsymbol{n}_{\mathrm{b}}$ 平行与 $\boldsymbol{n}_{\mathrm{p}}$，$\boldsymbol{m}$ 定义为与 $\boldsymbol{n}_{\mathrm{b}}$ 垂直。

调节步进长度 l 可以测得下个刀具中心点 C_{j+1}。此点与表面 ***SNK*** 之间的距离为刀具半径 R，它在允许的公差范围内。然后根据点 C_{j+1} 可计算出分隔干涉与非干涉区域的新点 B_{j+1}。持续检索直到新的检索点到达表面边界，再沿着平面边界检索。当再次检索到初始 B_0 时，检索点形成了一个封闭边界，至此检索终止。然后表面沿此边界进行调整，并将具有边界上球体干涉点的表面储存在 ***SG*** 中。

边界上起到分隔干涉与非干涉区域作用的起始点 B_0，可用 Start_ point 运算法则来进行识别。通过沿平面边界上的两点 A_0 和 A_1 之间的区域进行等分，可以找出该点。Start_ point 运算法则及程序代码如下。

```
Start_point(A0,A1,SNK, S ) ;
/* 给定表面 SNK 边界上两点 A0 和 A1,在这两点之间的边界上搜索起到分隔干涉
   与非干涉区域的点 B0 */
  {
     B(0)⇐(middle point of A0 and A1 along the surface boundary ) ;
     n⇐(surface normal at point B(0)) ;
     C⇐B(0) + R · n ;        /* 在点 B0 上的刀具中心点 */
     d⇐(minimum distance between point C and all other surfaces ) ;
     if ((d< (R - ε)) or ( d > (R + ε))) {
        do {
        n0⇐(surface normal at point A0) ;
        C0⇐A0 + R · n0;     /* 在点 A0 上的刀具中心点 */
        D0⇐(minimum distance between point C0 and other surfaces ) ;
        if (d < (R - ε)) {
           if (d0 < (R  - ε))
              A0⇐B(0) ;
         else
              A1⇐B(0) ;
         }
              else if (d > (R + ε)) {
                 if (d0 < (R - ε))
                   A1⇐B(0) ;
```

```
            else
                A0⇐B(0) ;
            }
            B(0)⇐(middle point of A0 and A1 along the surface boundary) ;
            n⇐(surface normal at point B(0)) ;
            C⇐B(0) + R · n;        /* 在点 B0 上的刀具中心点 */
            d⇐(minimum distance between point C and all other surfaces) ;
        } while ((d < (R − ε)) or (d > (R + ε))) ;
    }
    Return (B(0)) ;
}
```

当表面上包围区域的边界上所有点是球体干涉时，可用算法 ***NGI*** 对可能的干涉区域进行进一步的检测。检测算法及程序编码如下。

```
NGI (SI, SN, SG, S)
/* 给定 SG 表面的边界上所有点为球体干涉点，且给定工件所有表面 S。
识别干涉（SI）、和非干涉区域（SN）    */
  {
  if (all points on the boundary of SG interfere with another surface rb and their
     normal lines are neither perpendicular nor parallel)
       SI⇐SG ;               /* SG 上所有点与表面 ri 干涉 */
  else {
     project the boundary of SG onto XY plane ;
     if (the distance between Pp and ep is greater than R /* 见图 6-13 */
     {
        P⇐(the point on surface SG corresponding to point Pp) ;
        (u,v)⇐(surface parameter at point P) ;
        Δu⇐(step − over size of parameter u) ;
     B(0)⇐SG(u + Δu,v);       /* 表面 SG 上参数为(u + Δu,v)的点 */
     d⇐(minimum distance between point B(0) and other surfaces) ;
          do {
              /* 搜寻表面 SG 上分隔干涉与非干涉区域的起始点 B0 */
              u = u + Δu;
        B(0)⇐SG(u + Δu,v);                  /* 平面上的下一个点 */
        d⇐(minimum distance between point B(0) and other surfaces) ;
          } while ((d > (R + ε)) or (d < (R − ε))) ;
```

```
            identify the global interference -free region from point B(0) ;
        }
        else {
            sample grip points on SG, identify the interference condition on these
        points ;
            if (all points are interference points)
                SI⇐SG;
            else , identify the interference -free region ;
}}}
```

如果表面 **SG** 边界上的所有点为球体干涉点，可对其表面进一步研究。如果平面边界上所有点都与其他表面 S_i 干涉，没有表面法向向量与表面 **SG** 和 S_i 垂直或平行，则表面 **SG** 上的所有点与表面 S_i 存在干涉。

此外，将表面 **SG** 的边界投影到 *xy* 平面上去，根据定理 2 可分析点 P_p 投影在边界 e_p 区域内。为了节省计算时间，点的分析就沿着弯曲的正交线进行，并且只需对几点取样，如投影曲线的中点和末点等。如果 P_p 存在，就可根据此点来分析球体干涉区域。如果上述条件都不符合，则就对表面 **SG** 上的啮合点进行取样分析。将球体干涉区域储存在 **SI** 内，非干涉表面储存在 **SN** 内。至此，所有工件表面的干涉检测完成。

6.3.2 示例说明

图 6-16 所示是工业生产中的工件实例。当刀具半径为 10mm 时，深色区域表示待检干涉区域。局部干涉为圆柱表面，大型深槽的拐角为混合表面。在球体干涉检测过程中，会有一些边界点与其他平面干涉的加强肋表面，并且不存在平行或垂直的法线。因此，这些表面上的点为干涉点。表面 *A* 边界上的点与其他表面干涉，容易判断该点是否在平面边界的投影内。根据点与投影边界间的距离与刀具半径大小比较来判断出非干涉区域。

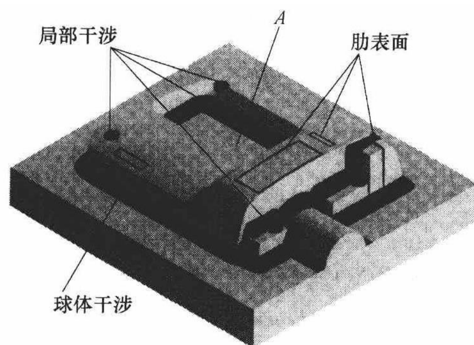


图 6-16 干涉检测实例

6.4 刀具的优化选择

在模具制造中刀具选择是项较为复杂的工作。它取决于几何表面的复杂约

束。大型刀具在移动过程中容易产生干涉。另一方面，小型刀具需较长的加工时间，必然造成刀具磨损。以上两种情况都会使加工成本增加。在大多数 CAM 系统中，刀具的选择通常是凭借操作人员的经验的。工程师面对复杂模具的加工，选择合适刀具尺寸是相当困难的。因此，有必要研发出一种能自动选择刀具的方法。

在雕塑表面加工工艺设计的过程中，刀具的选择非常关键。许多学者对此问题进行了研究。刀具的优化选择，需要同时考虑几何约束和加工时间。大多数研究者都是从以上两方面来研究这个问题。

6.4.1 前期工作

Bala 和 Chang[30] 对于在二维窄槽加工中多种刀具的选择问题进行了深入的研究。他们的方法仅限于两种刀具的尺寸选择。先选择与最小转角处的半径大小相当的较小的刀具。随后选择较大刀具沿着精加工刀具边界的方向加工除去小刀具余留下的切削面积。他们指出，对于某些几何类型的槽，这种方法选出的两种刀具会相差不大，而且整个加工时间的控制并未在他们的方法中考虑。

Lee 等人[31] 将工件表面分割成与 z 轴垂直的一系列平面，提出生成刀具路径方法。对于每一个平面根据 Bala 和 Chang[30] 提出的方法，用可判断每个二维轮廓的合适刀具。为了减少刀具的更换将一些平面合并，然后根据合并后的平面来选择刀具。如果在一个狭窄区域内只能是用一种小刀具，那么只有小刀具才能用于这些合并的平面。但在这项研究中并未考虑加工效率。

Yamazaki 等人[32] 介绍了一个用于选择刀具和判断需要使用 EDM 区域的系统。通过对表面的斜角鉴别，可将加工面分为“型芯”和“型腔”区域。选择三种刀具分别用于粗加工、半精加工、精加工。为每个加工过程选择可加工几何外形，又没有干涉的最大刀具。如果最小刀具不能对整个工件进行无干涉加工，将干涉区域留给 EDM 加工后，仍然使用它。运用刀具切削模拟，可判断未被加工区域。

以上研究者只考虑了几何外形约束，因此其刀具的选择可能不是最合理的。在每次加工过程中，刀具的数量往往限制在一到两个。为了解决这些问题，一些学者在他们的研究中同时考虑了几何外形约束和加工时间。

Lee 等人[33] 是根据工件的最终几何尺寸及原材料来选择切削刀具的。实体的加工模型，最先用布尔操作生成的。建立实体模型的数控编程八分体（octree）成为初始加工的目标。对于 octree 的主要部分用大刀具进行加工，而剩余的复杂部分就用小刀具加工完成。为了提高计算效率，使其 octree 与六面体相似。在此方法中，octree 的拐角可能不会被去除。在他们的研究中，刀具的选择要取决于 octree 的体积，而不需要考虑不同刀具的切削进给量。此外，研究中将不考虑刀

具的变更次数和无切削刀具路径（non-cutting tool path）。

Veeramani 和 Gau[34] 描述了以最少时间加工二维深槽，优选刀具尺寸的方法。此方法称为双相法（two-phase methodology）。所有可用刀具的路径和加工时间最先都以 Voronoi 的平台概念计算，最合适的刀具都是根据总的加工时间来选择的。切削与非切削时间都计算到加工时间中。但他们只对使用平面端铣刀的粗加工进行了研究，而且假设工件可以用足够小的刀具加工。

Chen 等人[35] 提出一种可确定深槽加工的平面切削刀具选择方法。采用该法选择刀具有以下两个步骤：第一步，对与 xy 平面平行并且拥有不同 z 值的不规则平面提取几何约束，同时判断每个不规则平面的可用刀具，面对每个不规则平面对一些候选刀具以及相应的加工时间进行评估；在第二步，刀具选择和加工平面的确定是为了最大限度地缩短整体加工时间。可采用两种方法，综合程序方法 IP 和动态程序方法 DP，来解决刀具选择和加工平面的确定问题。

Mizugaki 等人[18] 介绍刀具选择的一般算法。最先由 Z-map 方法判断刀具可加工的区域，再对刀具的加工时间进行计算。然后选出最合适的刀具，并减少总加工时间和未加工区域。但是，在此文中并未介绍加工时间计算的方法，如何计算每种类型的指数 F 也未被阐明。

为了减少候选刀具的数量，Kyoung 等人[36] 通过对几何约束进行分析来决定刀具尺寸的范围。大刀具尺寸可根据最大偏置距离得到。小刀具尺寸，则由凸起顶点的环绕半径确定，或者由凸起顶点与其他表面的最小距离来确定。不同刀具的路径随后生成，并计算这些刀具的加工时间。在计算各刀具组合的加工时间后，以总共加工时间最少的方案来优化刀具选择。

Yang 和 Han[23] 研究了精加工不同刀具尺寸的选择。他们先计算全部加工区域，再由干涉检测算法识别可加工和不可加工区域，考虑刀具尺寸、扇形柱高度以及可到达的表面区域，估计加工时间。具有最小总加工时间的刀具组，可选为最合适刀具。由于加工时间的计算是基于加工区域上的，并不生成刀具路径，所以在复杂模具加工中，通过这种方法可以从大量刀具中优化刀具选择。还有其他类似的方法也被用于这项研究中。

总而言之，许多学者对刀具的选择问题都进行了研究。其中的大多数都把精力集中在型腔的加工上，从几何约束、刀具路径总长度或者切削量的角度来选择刀具。但是，在复杂模具的精加工中除了几何约束外，表面精加工是选择刀具又一关键因素。精加工的刀具路径生成时间很长，不太可能为所有适用刀具生成刀具路径。因此就需要对精加工的刀具选择进行更多的研究。

6.4.2 选择标准

影响刀具选择的因素可分为六种：几何约束、制件成本、加工质量、加工精

度、刀具寿命以及加工刀具的性能。在这六种因素中，由于精加工的材料余量相对较小，加工所需的能耗也较低。假定 CNC 机床对所有可用刀具和进给速率有足够的动力和扭矩，因此，可以不考虑刀具加工的性能。由于模具经常采用由单个工件或小批量加工，因此刀具寿命不作主要考虑。假设在完成整个加工任务时不需要中途更换刀具，而且采用 CNC 机床进行铣削加工时加工精度取决于 CNC 机床，故加工精度也不是刀具选择的重要问题。因此，模具精加工刀具优选方案的制定主要取决于用最少的生产成本达到加工所需精度，同时还要满足几何约束。

精加工时加工质量是非常重要的，它将直接影响到加工时间。除了加工精度之外，扇形柱的加工高度也是决定加工质量的最重要因素。如图 6-17 所示，在表面加工中，在相邻两刀具路径间有一小段距离，称其为步距尺寸 g。在两刀具路径之间未被加工的材料称为刀尖峰（cusp）或扇形齿（scallop）。扇形齿的上峰高度称为扇形齿高。

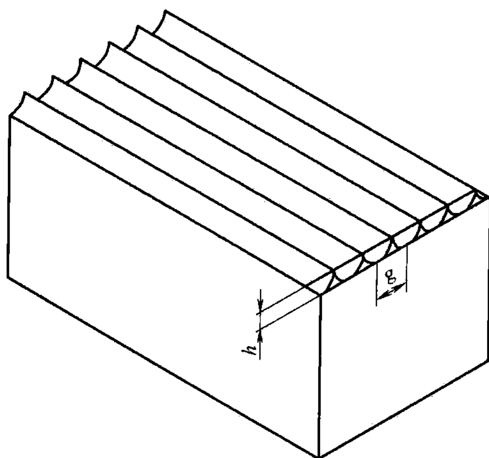


图 6-17　加工扇齿高 h 和步距 g

对所给轮廓，扇形齿高是由刀具尺寸、刀具路径步距尺寸以及表面形状决定的。如图 6-18 所示，虽然相邻刀具路径距离相同，但是不同尺寸刀具加工的扇形齿高是不同的。为了加工出相同的加工齿高，小刀具的步距会比大刀具的小些，这会导致更长的加工时间。

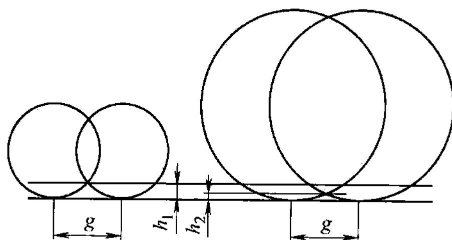


图 6-18　不同刀具尺寸引起的不同扇形齿高

在模具加工过程中，较短的加工时间可以减少总的加工成本，增大刀具的尺寸可以减少加工时间。最好的方法就是用最大的刀具进行加工。但是，这样也会带来一些问题，因为如果用大刀具加工，轮廓上会残留没有加工的大块区域，还需要用小刀具再进行加工，这就会导致加工时间延长。因此，优选刀具需要同时考虑加工时间和几何约束。

总之，刀具选择问题的解决如下述：首先给定模具工件和一些可用刀具，特别是球头立式铣刀，然后找出最佳的刀具尺寸，以期用最少的制造时间加工工

件，同时还要满足几何约束以及表面精度要求。

6.4.3 加工时间和区域

假设第 i 把刀具，其刀具路径长度为 L_i，进给量为 f_i，切削加工时间为 T_{mi}，则

$$T_{mi}=\frac{L_i}{f_i} \tag{6-3}$$

在精加工中，进给量 f_i 是由 CNC 机床和刀具尺寸来决定的。在刀具选择过程中，将 f_i 考虑为给定刀具的常量，进给量数据库根据车间里的可用刀具来建立。对给定的进给量，加工时间 T_{mi}是根据刀具路径的长度来确定的。刀具路径长度是加工面积 A_i 的函数。刀具路径分布以及刀具路径的步距 g_i 将分别在后面进行研究。

考虑到每个刀具尺寸的几何约束，加工区域、可行区域和未加工区域是可判断的。加工区域定义为需要使用刀具加工的区域。可行区域定义为使用刀具加工，且不会产生干涉的区域。未加工区域定义成加工区域减去可行区域所得的区域。这些区域相应的面积分别定义为加工区域 A、可行区域 A_f、及未加工区域 A_u。其中，可行区域和未加工区域，可以根据第 4 章介绍的干涉检测算法来得到，并且能算出其面积。

在计算刀具组的切削面积时，除了通过干涉检测识别可行区域外，还得考虑其加工工艺。如果刀具路径之间存在不连续，或者用不同刀具加工一个轮廓时，如图 6-19 所示，会在两刀具路径的共同边界上留有未加工材料。这通常是由于计算误差引起的，并将使表面精加工的质量变差。为了解决这个实际问题，使用较小的刀具加工前期刀具留下区域时，小刀具生成路径要与之前较大刀具生成的路径相重叠，如图 6-20 所示。重叠距离通常很小，大多数情况下假定所有刀具都为 2mm。因此，重叠区域的面积可以近似计算为：

$$A_{oi}=2S_{oi} \tag{6-4}$$

式中 A_{oi}——第 i 把刀具的重叠面积；

S_{oi}——前一把刀具留下的干涉区域的边界长度。

在加工实际中，第一把刀具是不存在重叠问题的。但是第一把刀具在该路径下生成的加工区域，比确保的整个区域要稍大些。假设这个区域的面积与刀具路径重叠的相同，则第 i 把刀具加工的面积 A_{mi}可计算为：

$$A_{mi}=A_{fi}+A_{oi}=A_{fi}+2S_{oi} \tag{6-5}$$

式中 A_{fi}——第 i 把刀具的可行面积。

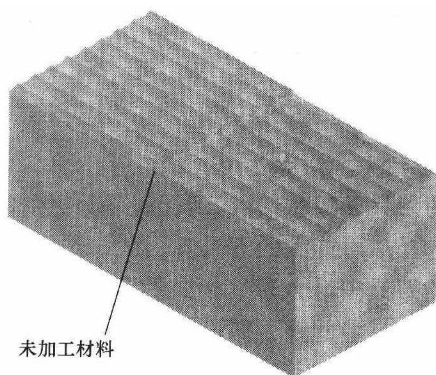


图6-19　因刀具路径不连续而留下未加工到的材料

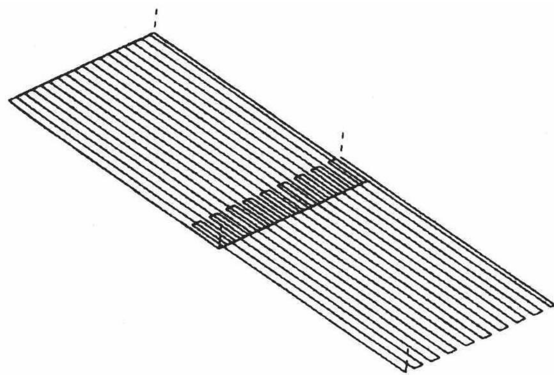


图6-20　两刀具路径重叠

6.4.4　步距和加工时间的预测

当表面曲线近似于直线时，如图6-21所示，半径 R_i 的刀具步距尺寸 g_i 和扇形齿高 h 可计算为

$$g_i = 2\sqrt{R_i^2-(R_i-h)^2} = 2\sqrt{2R_ih-h^2} \tag{6-6}$$

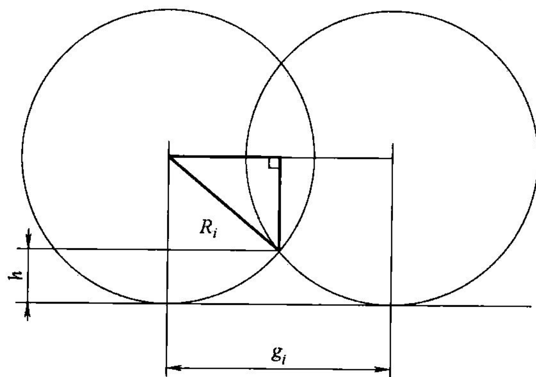


图6-21　步距尺寸计算

因此，第 i 把刀具的加工时间的计算为

$$T_{mi} = \frac{A_{mi}}{2f_i\sqrt{2R_ih-h^2}} + \frac{S_{ii}+S_{oi}}{2f_i} = \frac{A_{fi}+2S_{oi}}{2f_i\sqrt{2R_ih-h^2}} + \frac{S_{ii}+S_{oi}}{2f_i} \tag{6-7}$$

式中　A_{fi}——第 i 把刀具的可行面积；

f_i——第 i 把刀具的进给量；

R_i——第 i 把刀具的半径；

h——扇形齿高；

S_{ii}——第 i 把刀具的未加工区域的边界长度；

S_{oi}——第（$i-1$）把刀具的未加工区域边界长度。

因此，N 把刀具的总加工时间可表示为

$$T = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{A_{ii} + 2S_{oi}}{2f_i \sqrt{2R_i h - h^2}} + \frac{S_{ii} + S_{oi}}{2f_i} + t_c \right) \tag{6-8}$$

6.4.5 刀具选择算法

在加工一个给定表面面积时，需要较大的刀具和较少的加工时间。刀具选择的最佳方案就是在满足几何约束的前提下，选择尽可能大的刀具。因此，选择的最小刀具将是能不产生干涉地加工整个工件的刀具中最大刀具。如果没有一把刀具能不干涉地铣削整个工件，就选最小的可用刀具。此外，假设加工任务是从最大刀具到最小刀具的顺序进行的，则刀具选择的算法和其编码如下所列。

```
Select _ cutter (R, N, f, h)
  /* 给定半径 R 的刀具个数 N 及进给量 f,要求的表面齿高 h,选择可以在
     最短的时间内加工工件的最合适的刀具 */
     {
      i = 0
      S_o0 ⇐ (the boundary length of the entire region to be machined) ;
      do {
         detect interference for cutter R_i;
         calculate A_i & S_i for cutter R_i;
         i ++ ;                              /* 可用刀具的数量 */
      } while ((i < N) && (the cutter cannot machine the entire workpiece)) ;
       T = 10^10;                         /* 足够大的初始最小加工时间 */
      for (k = 0; k < I; k ++ ) {
  (t_k, R_k) ⇐ (calculate the minimum machining time and identify the correspond-
              ing cutters for the given i cutters) ;
    if (t_k < T)
    (T, R_s) ⇐ (t_k, R_k) ;      /* 最小加工时间 T 和相应的刀具组合 */
}}
```

在选择刀具的过程中，输入所给工件的表面、N 把半径 R 的可用刀具、相应的进给量 f 以及表面扇形齿高 h。假设刀具的编排按照刀具尺寸从大到小的顺序进行，则输出即为所选的最佳刀具。

第 4 章介绍的干涉检测算法可用于检测特定刀具的干涉区域。可以先算出加工整个区域的长度 S_{o0}，再判断出干涉区域边界、可行区域和未加工区域。由于大刀具的可行区域也适用小型刀具，因此仅需要对前一把刀具留下的非可行区域进行检测分析，计算出相应的面积 A_i 和边界长度 S_i。这里的 A_i 定义为第 i 把刀

具加工整个工件的假设下的可行面积。

重复以上的步骤，直至检测出最小可用刀具，或者是可以加工整个工件的最大刀具。如果没有一把刀具可以精加工整个工件，则未加工区域就用电极来加工。该部分内容将在下节进行介绍。

给定的刀具更换数量要在判断出最少加工时间和相应的刀具组合后再确定。在确定加工时间时，可行面积A_{fk}和边界长度S_{ok}可分别由式（6-9）及式（6-10）计算

$$A_{fk}=A_k-A_{k-1} \tag{6-9}$$

$$S_{ok}=S_{i(k-1)} \tag{6-10}$$

其中，k和（$k-1$）表示第k和（$k-1$）个被选刀具。根据A_{fk}、S_{ik}和S_{ok}的值，可使用式（6-3）估算所给刀具的加工时间。通过对不同刀具组的加工时间的比较，便可得出能在最短时间t_k下加工工件的刀具R_k。从中选出最合适刀具R_s，以使用最少的总时间T来加工工件。

6.5 计算机辅助电极设计和加工

6.5.1 概述

在加工具有雕塑曲面的模具时，电火花加工EDM扮演着非常重要的角色。比起CNC铣削加工，其加工过程较慢。但是EDM非常精确，适合加工深而窄的型腔。它可以实现无人操作，加工CNC铣削无法加工到的轮廓。此外，其加工效率更多的取决于工件的导电性能而不是硬度。因此，大多数模具制造公司使用EDM对硬度较高的材料，或对铣削无法加工到的区域进行精加工。

图6-22所示为EDM过程的图解。在EDM过程中，材料被一系列的放电火花蚀除。放电是在电极和工件之间间隙中产生的。当电极和工件两点间的液体被电离时，流体介质就会产生放电途径。包围导电体周围的介质放电产生能量，使电介质中的导电体被蒸发和分解。在持续导电下，放电束的直径会膨胀并且会瞬间增加。

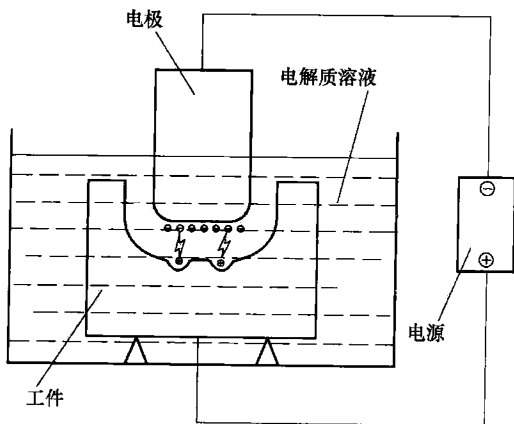


图6-22　EDM工艺示意图

放电的小块面积会被加热到极高的温度。工件上微小材料的温度到达并超过其熔点后即被蚀除。

在 EDM 中，加工性能取决于表面粗糙度、放电间隙、金属蚀除率 MRR 和电极损耗。在这些因素中，前四个参量能用电压、电流、频率、电容和液体来控制。表面粗糙度是电流除以频率的函数。放电频率的增加可降低表面粗糙度。放电间隙等同于放电火花的长度，取决于初始电压和放电能量。金属蚀除率取决每次火花放电和放电频率所蚀除的金属体积。每放电一次蚀除金属的体积是放电能量的函数，并且随着电流的上升而增加，同时还受到工件熔点的影响。

电极损耗取决于电极材料和放电能量。具有良好电极耗损特性的材料，也同样加工困难。具有较高熔点的这些材料，要求有大量能量来熔化给定的体积。最为广泛使用的石墨材料不会熔解但会在电火花中直接气化。对于给定的尺寸，气化相比金属电极的熔化需要更多的能量，而这恰好符合石墨的损耗特性。

EDM 的研究者的主要精力都集中在电极损耗的研究上，以期得到更快、更高效的材料蚀除率，同时还要提高表面的光整性，降低表面粗糙度。Mohri 等人[37]对于电极损耗在初始和稳定阶段如何改变进行了研究。Lonardo 和 Bruzzone[38]研究了电极的材料、尺寸、冲洗、切削深度，以及导轨运动在电火花加工中的影响。在他们的研究中还包括工件蚀除率、电极损耗、精度和表面材质等内容。

一些研究者对 EDM 的工艺规划进行了研究。Kruth[39]为模具设计和制造引入了 CAD/CAM 系统，使模具制造成为 CAD/CAM 和 EDM 的综合体。他们在系统中系统考虑了 EDM 的工艺规划、电极制造及 EDM 工艺的在线控制等内容。Lauwers 和 Kruth[40]介绍了用于 EDM 操作工艺规划系统。该系统可对工艺规划和工艺规划的优化进行评估。工艺规划的优选基于三种影响成本的因素：加工成本、电极成本和工件安装成本。但是，如何设计雕塑曲面的电极，并未在此系统中研究。

一些学者研究了计算机模拟 EDM 的加工过程。Dauw[41]的研究主要集中于对电火花加工过程的几何模拟。主要模拟显示电极的损耗过程，以及工件几何外形的加工成型过程。Kunieda 等人[42]介绍了冲模沉降的电火花加工逆向过程的模拟方法。为了能获得工件最终所需形状，研究如何获得近似的电极形状。

Bayramoglu 和 Duffill[43]提出了在线切割加工基础上，对三维轮廓加工“框架电极”的方法。这种方法设计电极是根据三维框架形状进行的。加工过程中电极沿框架的法线方向进给。这使原材料在框架的内部被蚀除掉。虽然这种方法可以提高 EDM 的材料蚀除率，但是电极的加工是复杂的。只有简单形状的表面可以用此方法加工。

Yu 等人[44]研究采用扁平立式电极，应用 2-1/2 维 CNC 加工三维深腔轮廓。

在他们的方法中，电极为扁平立式刀具，工件被一层一层地蚀除。根据邻近的两层的情况来规划刀具路径，并且颠倒刀具路径的方向以及起点和终点。因此，可实现电极端面的平均损耗。电极的损耗可以在深度方向上进行补偿。这种方法，可以使用简单形状的电极，精确地加工三维轮廓。不过研究者指出，此种方法的加工效率较低。此外，该法轮廓的精度取决于电极长度误差及对其适当的控制。

总之，这些研究者的研究都集中在如何控制 EDM 参数或电极形状来提高加工精度和效率，或者如何用形状简单的电极来加工一些特定的轮廓。但是，他们都没有解决如何找到 EDM 蚀除的区域，如何自动设计能加工任何三维轮廓的电极的问题。在这些方面还需要进一步的研究。

6.5.2　EDM 电极设计原理

本节将介绍由工件的几何体设计电极的方法和工具。以电极的定义边界，通过曲线修剪、实体延伸和布尔操作，系统会自动生成电极。电极设计中拐角处干涉检测的算法，也将在本节介绍。

通常，电极包含电极工具和夹持部两个部分，如图 6-23 所示。其中，电极工具用来成型工件的几何外形。电极夹持部是在电火花加工中用来夹紧电极工具的。这两部分常设计在同一结构中。在接下来的陈述中，将电极工具称为电极。在图 6-23 中的 CNC 和图 6-24 中的 EDM 电极有着不同的位置坐标系。为了避免混淆，将 EDM 加工中的电极坐标系规定为标准位置，也就是与电极夹持部连接后的电极工具顶表面。

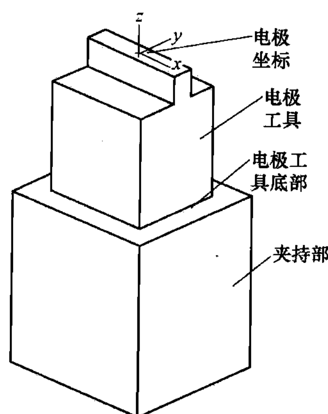


图 6-23　EDM 电极

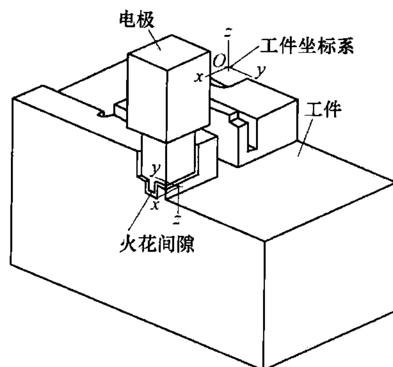


图 6-24　电极和工件

在复杂模具制造中要大量使用电极，为了减短模具制造的时间，电极通常是由 CNC 机床来加工的。因此，在这个系统中假设电极是由 CNC 铣削加工的，且已将其加工到逼近工件的形状。此外，电极设计模型能由模具设计系统输出的三维工件实体模型转换而成。因此，工件需要设定为实体。

电极在电火花加工时要加工工件，为此电极本身必须在使用之前被加工到所需的形状。也就是说，电极必须根据成型工件的几何体生成。下面介绍电极设计的原理。

1）电极是用于成型工件的几何状的，可视为具有成型形状功能的刀具。根据 CNC 和 EDM 的加工工艺需要，可以用两到三个电极组合成一个电极，同样也可将一个电极拆分成几个电极。

2）为了提高加工的效率，在 EDM 加工中分别采用粗加工、精加工、甚至半精加工的电极。这些电极的放电间隙都是不同的，因此它们的几何外形也截然不同。但是，这些不同的电极只是体现在 EDM 间隙的表面偏置值上。在加工电极而生成 CNC 铣削加工程序时，可以通过设置不同的余量（相当于火花间隙），在同一个电极模型中分别生成粗加工电极、半精加工电极和精加工电极。因此，只需要使用一个电极模型就可以生成这三种电极，而且所设计的电极尺寸和工件相同。

3）在 EDM 加工中，电极上未加工的余留材料会导致对工件的过度电蚀。因此，需要将电极设计成能被 CNC 铣削完整加工的实体。

4）使用高速铣床可很容易地切削电极材料，高速铣削在电极加工中应用广泛。相比电极的设定时间，CNC 铣削加工的时间是比较短的。因此，电极应该设计成能用一个 CNC 程序来加工完成。

5）需要电火花加工的表面区域可能很小，但是经过 CNC 和 EDM 加工过的电极不宜过小。如果可能，电极的毛坯材料应该达到标准尺寸。

6）在 EDM 加工过程中使用电极时，电极和工件之间的位置关系是非常重要的，电极上必须有清晰的参考点。在如图 6-23 所示的实际情况中，通常用电极工作坐标系的原点作为电极设计中的参考点。

6.5.3 电极工具的设计

电极工具通常都含有雕塑曲面。这些雕塑曲面要用 CNC 机床来加工。因此，被设计的电极刀具应该是表面或实体模型。有两种方法可以用来得到电极的几何体/表面。一种方法从工件中抽出表面，然后根据这些表面来构造电极。但电极通常是由几个表面组成的，要全部得到这些表面是困难的。此外，电极需要的区域可能只是表面的一部分，用于成型电极的表面需要修剪成电极边界。而要想实现表面自动化修剪的操作是非常困难的，也相当的费时。

第二种方法运用布尔操作，生成贯穿边界的电极工具。此方法的原理及步骤如下。

1）定义所需 EDM 电极的边界，生成曲线。

2）在 z 轴方向上，将曲线延伸创建实体。

3）用布尔操作将延伸体减去工件，生成与工件形状相反的电极刀工实体。

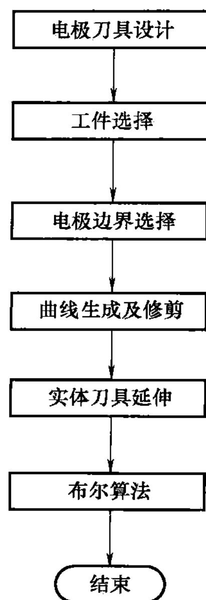


图 6-25　电极刀具设计系统流程图

用这种方法，可判断需要 EDM 的表面，并且通过布尔操作自动修剪生成的电极是实体模型。因此，第二种方法被用在了报告的系统中[45]。如图 6-25 所示，电极刀具设计模块包括有工件选择、电极边界识别、曲线生成和修剪、实体刀具延伸和布尔操作等。它们都将在下文中进行介绍。

1. 工件和电极边界的选择

先选择工件，计算其 z 轴方向极限值（z_{max}，z_{min}）。然后用这些值来控制延伸刀具体的高度。一般而言，只有无法用 CNC 铣削刀具加工时，才使用 EDM 加工。在铣削刀具选择之后，就能确定电极的边界。使用这种方法，在干涉检测和刀具选择后，可以检测出刀具无法加工到且无干涉的区域。由于干涉区域的边界是封闭的，可以直接使用在电极的设计上。但是对于一些工艺，如很难加工材料或要采用相同的 EDM 加工设置等，即使其表面轮廓可以用铣刀加工，也需要用到电极。加工边界确定后，就可由用户选择并定义电极的边界了。辨别干涉面积的方法已经在 6.3 节中介绍过了，本节主要侧重于介绍后者，即由用户来选定电极的边界。

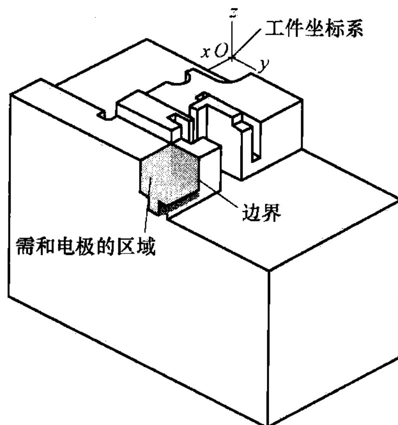


图 6-26　电极边界判断

确定电极的边界需要用到电极加工的工件区域，如图 6-26 所示。它们用来生成延伸刀具体并形成一系列的封闭环。一个封闭环或/和边界意味着表面边界或曲线将首尾相接。在它们之间将不会有间隙或重叠。为了高效生成电极，曲线和表面边界都将被选为电极的边界。选择曲线和表面边界的算法及代码如下。

Select_curve_boundary（***W***，***c***，*m*，***b***，*n*）

/＊ 给定工件 ***W*** 和 *m* 个可用曲线 ***c***，选择曲线和表面边界作为电极 ***b*** 的

```
          边界,b 的数量为 n  */
      {
        (e,l)⇐(search all l surface boundaries e of the workpiece W) ;
        (bd,k)⇐((c,m) + (e,l)) ; /* 将所有表面边界和曲线放入 bd,k 为
                                     bd 的数量 */
        b(0)⇐bd(i) ;               /* 用户选择第一边界 */
      n=1 ;
      if (b(0) is not closed) {
        bc=0 ;  /* b 为非封闭 */
        P1⇐(one endpoint of b(0)) ;
      Display arrow on b(0) which points to P1;      /* 定义搜索方向 */
      If (the arrow is reversed by the user) ;
        P1⇐(the other endpoint of b(0)) ;
    P0⇐(the endpoint other than P1 of b(0)) ;
   do {
       if (selected by user) {
          b(n)⇐(selected boundary/curve) ;
          n++ ;
      }
      else if (user create curve) {
          call functions to generate the curve ;
          b(n)⇐(generated curve);
          n++ ;
     }
     else {
j=0 ;                       /* 与 b(n)连接的曲线/表面边界的数量 */
       for (i=0; i<k; i++) {
          if (bd(i) is not b(n)) {
              d⇐(the distance between point P1 and bd(i)) ;
              if (d<ε) {                        /* ε 足够小 */
                 ec(j)⇐bd(i)  /* 与 b(n)连接的曲线/平面边界 */
                 j++ ;
}}}
for (i=0; i<j; i++) {
   highlight ec(i);                 /* 为用户接受或拒绝曲线/边界 */
```

```
    if ((ec(i) is the wanted curve/boundary) {   /* 用户决定 */
      b(n)⇐ec(i) ;
            n++ ;
}}}
P1⇐(one endpoint of b(n-1)) ;
display arrow on b(n-1) which points to P1
if (the arrow is reversed by the user);
   P1⇐(the other endpoint of b(n-1));
P2⇐(the endpoint other than P1 of b(n-1));
d⇐(the distance between P0 and P2) ;
if (d<ε)
   bc=1 ;                                          /* b 是闭合的 */
} while ((bc==0)&&(user does not ternminate the selection)) ;
}}
```

2. 曲线的生成和修剪

用表面边界操作来修剪和投影是困难的，如果所选的电极边界是表面边界类型，就需要自动生成一条曲线来描述表面边界，然后再将其投影曲线到 xy 平面上，如图 6-27 所示。

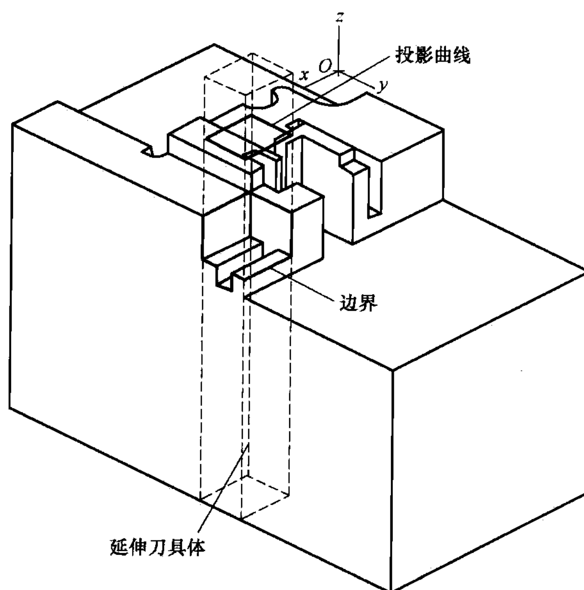


图 6-27 曲线投影和实体工具延伸

当工件文件由其他 CAD/CAM 系统转换而来时，应该首尾相接的表面边界可能连接不好，而出现间隙或重叠，由它们生成的曲线也会衔接不良。为了能用这些曲线生成实体的电极工具，就需要对它们进行修剪，使其能首尾相接。如图 6-28 所示，有五种类型的曲线相对关系。在图 6-28a 中，此曲线来自于完整封闭环；在图 6-28b 中，曲线的终点未到达相交点，曲线必须延长；在图 6-28c 中，曲线的终点在交点外，交点外的部分必须要被修剪掉；在图 6-28d 中，整个曲线完全在交点的外部，此曲线需要先延长，再将超出的部分修剪掉；在图 6-28e 中，两曲线并未相交，它们之间存在间隙或重合。

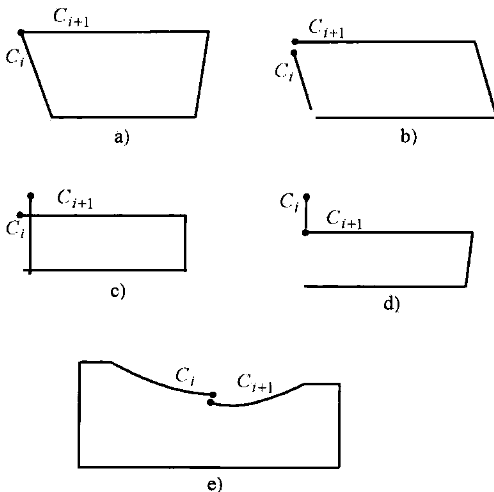


图 6-28 曲线修剪/延伸的条件

很明显，这些曲面根本无法通过修剪或延长来使其相接。使它们相接的方法是从这两条曲线的终点构建直线。但是这样会在曲线间形成尖角，在 CNC 加工中会产生一些问题。另一种方法是移动其中一条曲线的终点使其与所要求的终点重合。由于间隙或重合通常是由系统的误差引起的，两曲线终点之间的距离相对较小，故由移动曲线终点所引起的误差是允许的。曲线修剪的算法如下所述。

```
Curve_trim(C,n)            /* 给定 n 个曲线 C，修剪使其形成封闭环 */
  {
    for (i=0; i<(n-1); i++) {
        d⇐the distance between C_i and C_{i+1};
        (P_i, P_{i+1})⇐(two endpoints on C_i and C_{i+1} with minimum distance) ;
         if (d>ε) {                    /*ε 足够小 */
            find the intersection point P of C_i and C_{i+1};
          if (P does not exit)
                move P_i to P_{i+1};
           else if (P is outside C_i and C_{i+1})
              extend curves C_i and C_{i+1} to P ;
           else
              cut off the portion of curves C_i and C_{i+1} outside P;
        }}
```

trim C_0 *and* C_{n-1};

}

3. 实体工具延伸和布尔操作

在 z 轴方向上延伸修剪过的曲线，生成了如图6-27所示具有曲线外形的实体工具。为了防止从工件放电火花达到电极夹持部上，延伸工具体要高于工件的最高点。而且其间隙值要大于最大可能的火花放电间隙，如5mm。工具体的最低点与工件的 z 轴方向最小值相同。如图6-29所示，将工具体减去工件就可得到与工件形状相反的电极工具了。

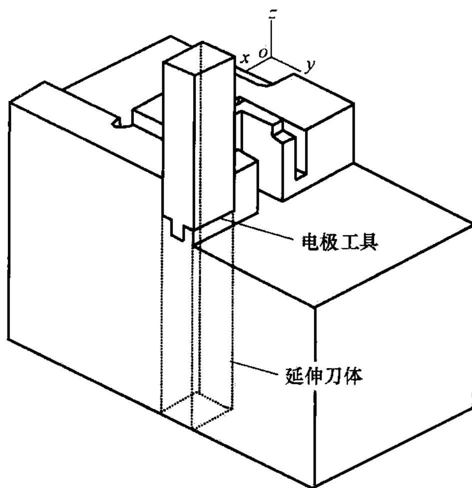


图6-29 Boolean布尔操作

6.5.4 电极夹持部的设计

为了设置CNC和EDM的相关点，电极夹持部设计成矩形柱体。应该尽可能使用标准尺寸的电极夹持部，甚至能使用标准夹持部，以使在CNC和EDM过程中大量减少电极创建时间。构建包括标准尺寸电极夹持部的用户数据库。当电极夹持部生成后，置于电极工具的顶部，各自的中心方向与 x、y 方向一致，如图6-29所示。

在CNC和EDM中使用电极的世界坐标系（WCS）。它将反映出电极和工件的相对位置，并且可简化CNC和EDM工艺过程。对CNC和EDM的电极WCS设置都相同。WCS的坐标轴应该与工件的WCS相应的坐标轴平行。WCS的原点设置在 x 和 y 方向上电极夹具的中心点，位于电极工具的底部。电极夹具的生成和WCS的设置步骤如下所述。

Create _ holder _ WCS(*T*)

/* 给定所设计的电极工具 **T**,创建电极夹持部 **H** 和设置电极WCS坐标系统 */

{

T⇐(*select the electrode tool*(*s*)) ;

(*X* ,*Y*)⇐(*the dimensions of* **T** *in x and y directions*) ;

if (($X \leqslant L_{max}$)&&(YL_{max}))/* 其尺寸小于电极夹持体的最大标准尺寸 */

(*X*, *Y*)⇐(*selected the size fit for the electrode tool*(*s*) *from the standard size database*);

```
else
    (X, Y) ⇐ (integral multiple of 5 that fits the electrode);
create H and put it at the top of the electrode tool(s) T;
unite H with T;
set the WCS for the electrode;
}
```

6.5.5 尖角干涉的检测

如前面所讨论的，铣削加工的干涉根据加工轮廓的形状分为三种类型：局部干涉（local interference）、球体干涉（global interference）及深槽轮廓干涉（deep profile interference）。通常，这三种类型干涉可以通过改变刀具的尺寸来避免。在电极的设计中存在一种新干涉类型，尖角干涉可能会出现。如图6-30所示，尖角干涉出现在两个表面形成的共同边界上，是任何刀具都无法加工的尖角。所谓的尖角干涉，实际上是球体干涉的特殊形式。如6.3.1节所介绍的，如果出现这类干涉可以根据球体干涉检测算法判断所给刀具的干涉区域。

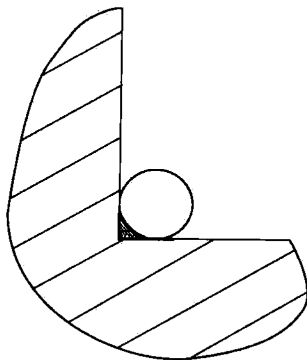


图6-30 尖角干涉

由于尖角干涉是由工件的几何外形所引起的，所以存在这种干涉时，材料将不能用同类的刀具来去除。此外，电极材料相对容易加工，并且其尺寸通常也较小，因此加工电极的刀具尺寸也很可小，如直径只有0.5mm用于切削电极的小刀具，因而经常使用长径比大的刀具。因此，只有在没有刀具能到达无干涉切削时，才对电极的尖角干涉考虑电极设计。

电极通常采用CNC铣削加工。有两种铣削刀具常用于电极加工中：扁平立式铣刀和球头立式铣刀。这两种刀具的主要区别在于前者底部有锐边，而后者底部是球形面。这两种刀具都不能加工的轮廓，也不能用其他刀具对其加工。因此，本节只对球头立式铣刀和扁平立式铣刀进行讨论。

1. 术语

在检测尖角干涉之前，先介绍一下在本节中使用的一些专门名词，如图6-31所示。

1）共同边界 $\boldsymbol{e}$：两个相连的表面共有的表面边界，$\boldsymbol{e}=\boldsymbol{r}_1(s, t)\cap\boldsymbol{r}_2(u, v)$。

2）边界法向平面 $\boldsymbol{P}_n$：在 $\boldsymbol{e}$ 上包含点 P_t 的平面，它垂直于 $\boldsymbol{e}$ 在点 P_t 处的切向矢量 $\boldsymbol{t}_e$。

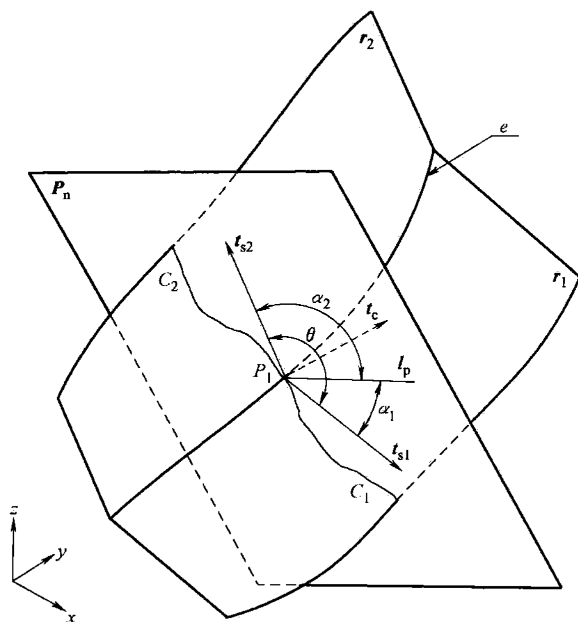


图6-31 表面角和方向

3）表面切向矢量 $\boldsymbol{t}_{s1}$ 和 $\boldsymbol{t}_{s2}$：$\boldsymbol{P}_n$ 与两相连平面 $\boldsymbol{r}_1$、$\boldsymbol{r}_2$ 相交，生成两条相交曲线 $\boldsymbol{C}_1$ 和 $\boldsymbol{C}_2$。在这两曲线相交顶点 P_t 上的切向矢量 $\boldsymbol{t}_{s1}$ 和 $\boldsymbol{t}_{s2}$ 定义为，在该点上的平面切向矢量。

4）平面切向角 α_i：P_n 与一平面相交，该平面含有点 P_t 并且与 xy 平面平行，生成直线 $\boldsymbol{l}_p$。$\boldsymbol{t}_{si}$ 与 $\boldsymbol{l}_p$ 之间的夹角为角 α_i。如果 $\boldsymbol{t}_{si}$ 的 z 轴方向为正，$\alpha_i>0$，相反则 $\alpha_i \leqslant 0$。如图6-31中，$\alpha_1<0$，$\alpha_2>0$。

5）角 θ：$\boldsymbol{t}_{s1}$ 和 $\boldsymbol{t}_{s2}$ 之间的夹角，它在没有工件材料的一侧测量，范围为 $0° \leqslant \theta < 360°$。

2. 尖角干涉

当两个相连表面在共同边界形成尖角时，可能会出现干涉。干涉的条件取决于表面边界矢量 t_e、角 α_i 和 θ 等。

1）如果 $\theta \geqslant 180°$，如图6-32a所示，在两表面的共同边界上，对于球头刀和扁平立式铣刀都不会出现干涉。

2）如果 $\theta < 180°$，如图6-32b所示，球头立式铣刀会出现干涉。而对于扁平立式铣刀，如果边界切向矢量 $\boldsymbol{t}_e$ 与 xy 平面平行时，必须对平面切向角 α_1 和 α_2

进行检验：如果 $\alpha_1 \leqslant 0°$且 $\alpha_2 \geqslant 90°$，如图 6-32c 所示，将不会存在尖角干涉；反之，就会出现干涉，如图 6-32d 所示。

3）如果 t_e 与 xy 平面不平行，如图 6-32e 所示，将产生干涉。

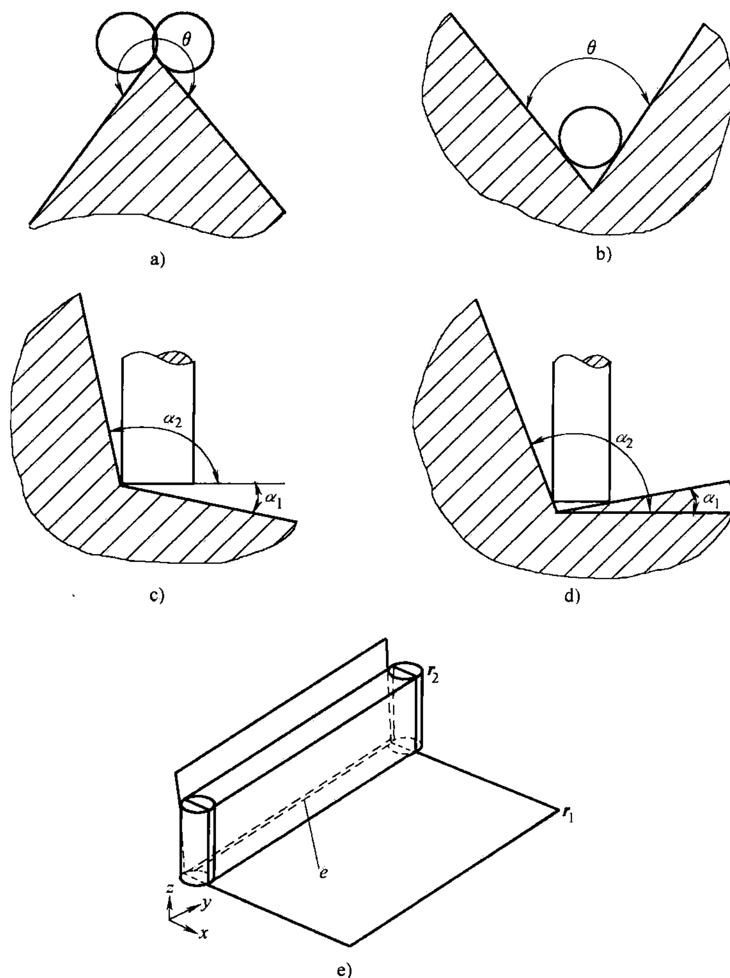


图 6-32 使用扁平或球头立式铣刀时的尖角干涉情况

a）$\theta \geqslant 180°$ b）$\theta < 180°$ c）$\alpha_1 \leqslant 0°$ d）$\alpha_1 > 0°$ e）e 不平行于 xy 平面

对尖角干涉条件的总结，如表 6-1 所示。从表中可知，如果扁平立式铣刀存在尖角干涉，则其他任何刀具对该表面边界进行铣削都会产生干涉，电极就必须重新设计。

表 6-1 取决于两平面交线的尖角干涉条件

<table>
<tr><td rowspan="6">平面法向角
α_1、α_2 和 θ</td><td rowspan="2">θ</td><td colspan="4">扁平和球头立式铣刀的干涉</td></tr>
<tr><td>球头刀</td><td colspan="3">扁平刀</td></tr>
<tr><td>≥180°</td><td>不是</td><td colspan="3">不是</td></tr>
<tr><td rowspan="3"><180°</td><td rowspan="3">是</td><td rowspan="2">t_e 与 xy 平面平行</td><td>$\alpha_1 \leqslant 0°$ 且 $\alpha_2 \geqslant 90°$</td><td>否</td></tr>
<tr><td>所有其他</td><td>是</td></tr>
<tr><td>t_e 与 xy 平面不平行</td><td colspan="2">是</td></tr>
</table>

3. 算法

基于以上的讨论，尖角干涉检测的算法如下所述。

```
Sharp_corner_interference_detection(e, n)
  /* 给定表面共同边界e,数量n,发现干涉边界SP_EDG,SP_EDG数量为m
     */
{
        for (i=0, i<n; i++) {
          (r1, r2)⇐(surfaces sharing e(i)) ;
          (Pt, k)⇐e(i) ;                  /* ei 上点 Pt 的取样 k */
          j=0 ;
         interference_sign = 0 ;       /* 检测无干涉 */
         do {
            te⇐(boundary vector at point Pt(j)) ;
            Pn⇐(surface normal plane at point Pt(j)) ;
          (C1, C2)⇐(r1, r2 and Pn);                 /* 相交曲线 */
          ts1⇐(surface tangent vector of r1) ;
          ts2⇐(surface tangent vector of r2) ;
          (α1,α2,θ)⇐(calculate angles between ts1 & ts2) ;
          if (θ<180°) {
              if (te parallel to xy-plane) {
                  if (α1 >0°&&α2 180°) ;
                     interference_sign =1 ;     /* 检测干涉 */
                 }
               else
                  interference_sign = 1 ;
            }
           if (interference_sign == 1) ;
                highlight e(i)     /* 要求用户重新设计电极 */
           j++ ;
```

```
        } while ((interference_sign == 0)&&(j<k));
    }}
```

在检测尖角干涉的过程中，要判断电极的所有表面边界。随后分析一个表面边界，判断共有表面边界的平面 r_1 和 r_2，对表面共同边界的一些点进行取样。取样的方法是，这些点沿着表面边界的曲线的长度相同。检测的精度取决于点的数量。

然后计算出取样点的角度，再计算出取样点 P_{ij} 上的平面边界矢量 t_e，建立平面边界法向平面 P_n。P_n 与平面 r_1 和 r_2 相交，并建立相交曲线 C_1 和 C_2，在它们的共同交点 P_{ij} 上算出平面切矢量 t_{s1} 和 t_{s2}。接着再算出角 α_1、α_2 和 θ，最后再根据这些角来检测尖角干涉。如果该点上没有尖角干涉，则对下一点进行检测，直到平面边界上的所有干涉点被检测过。如果检测出尖角干涉，电极就必须重新设计。一般来说，电极需要沿干涉边界上分成两个或多个电极。

6.5.6 示例说明

计算机辅助刀具选择和电极设计系统 CSEDS[45]，是用于无人或很少人工操作的 3 轴模具加工，能自动选择刀具和设计电极的系统。如图 6-33 所示，CSEDS 的功能如下：先由用户选择工件和可用刀具，接着根据这些刀具来自动检测干涉，判断出干涉区域；计算出这些刀具的加工时间，在最短时间内完成工件加工的刀具组，作为最佳刀具；为刀具无法加工到的区域设计电极；根据用户定义来设计电极边界，以选择刀具和设计电极，自动生成刀具路径。该系统包括五个主要部分：接口、数据库、干涉检测模式、刀具选择模式和电极设计模式。系统的输入包括工件的几何外形、尺寸、可用刀具的进刀量和要求的表面扇形齿高度，输出则是选定的最佳刀具和设计的电极。

图 6-34 所示为手机外壳型芯的加工实例。除了底部和 4 个侧面，还有 87 个其他表面需要加工。总的加工面积为 28 244.6mm^2，被加工区域的边界长度为 695.4mm。还有 52 个凸面和 35 个凹面。这些表面中最小的曲率半径是“耳孔”，0.516mm。图 6-35a 所示的深色区域，是刀具半径为 20mm 时检测到的干涉区域。由于“耳孔”的曲率半径比刀具半径还小，这些表面为局部干涉面。对于球体干涉检测来说，一些表面有球体非干涉边缘，如上面的大平面。因此，球体干涉只需沿着这些表面的边缘进行检测，无需检查表面的里侧边缘。在电加工表面上的一些点为球体非干涉，其余的则不是。随后以表面边缘上的起始点，寻找抗干涉点的位置，这样就能检测出球体非干涉区域。图 6-35b 所示为当刀具半径为 2mm 时检测的干涉区域。对比后可发现干涉面积比图 6-35a 中的要小很多。刀具的半径、进刀量、可行和不可行区域以及不可行区域的长度在表 6-2 中列出。刀具加工整个模具时会有干涉，因此选择的最小刀具其半径为 2mm。

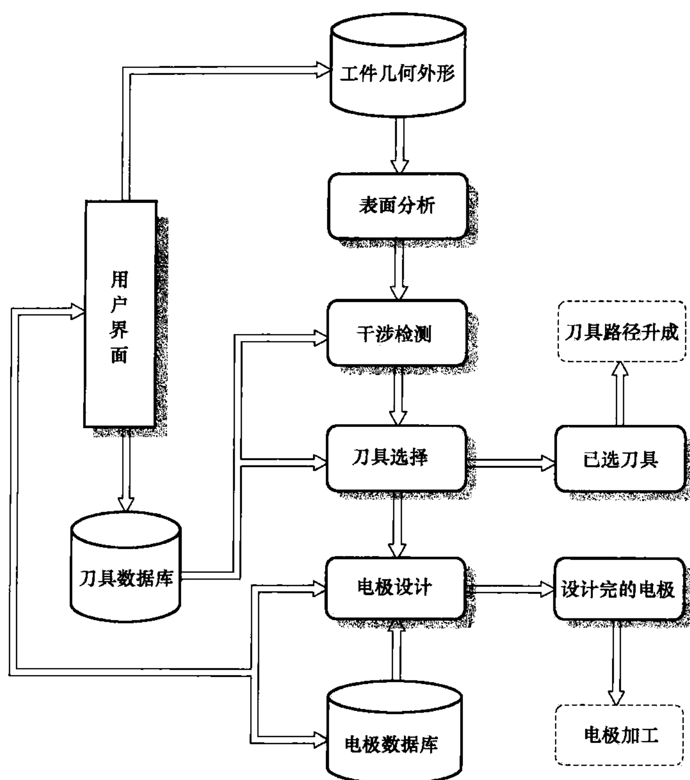


图 6-33 CSEDS 结构图[45]

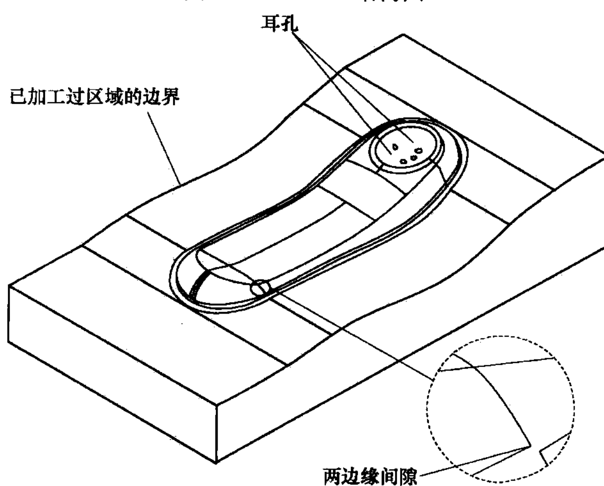


图 6-34 手机外壳模具

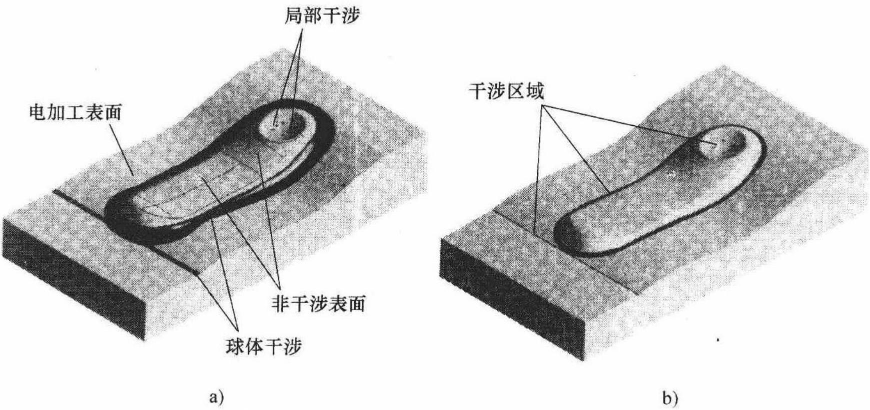


图 6-35　不同刀具尺寸的干涉区域

a）刀具半径为 20mm　b）刀具半径为 2mm

表 6-2　可行/非可行区域面积和非可行区域的长度

	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
R_i/mm	20	15	12	10	8	5	2
A_{ui}/mm^2	4 927. 8	4 264	3 614. 2	3 193. 6	2 760. 5	2 321. 3	1 026. 9
A_i/mm^2	23 316. 8	23 980. 6	24 630. 4	25 051	25 484. 1	25 923. 3	27 217. 7
S_{ii}/mm	796. 5	772. 1	751. 1	766. 4	748. 3	719. 6	690. 5

在表 6-3 中列出了刀具不同更换次数下的最少加工时间。从表中可以发现，在不同刀具组合中，(R_0、R_6) 组合的刀具可以用最短时间加工模具，106. 6min。因此，这个刀具组被选为最佳刀具。在这个实例中，最少加工时间是最长加工的 1/3，最长加工时间是 330. 8min。因此，最佳刀具的选择应以最大程度缩短模具的加工时间为原则。由于可用刀具不能在没有干涉的情况下加工整个工件，就需要用电极加工未加工区域。图 6-36 所示为自动设计的一些电极。由于“耳孔”的干涉区域非常小，电极可构成一个整体。相反，虽然电加工表面上的干涉区域边界形成一个封闭环，但在实际中，并不能优化设计大型电极来加工该区域，可将电极拆分成一些小电极。

表 6-3　不同换刀次数的最少加工时间

刀具数量	加工时间 t_i/min	刀具组合	刀具数量	加工时间 t_i/min	刀具组合
1	330. 8	R_6	5	145. 8	R_0、R_1、R_2、R_5、R_6
2	**106. 6**	R_0、R_6	6	164. 8	R_0、R_1、R_2、R_4、R_5、R_6
3	110. 5	R_0、R_4、R_6	7	183. 2	R_0、R_1、R_2、R_3、R_4、R_5、R_6
4	120. 6	R_0、R_2、R_4、R_6			

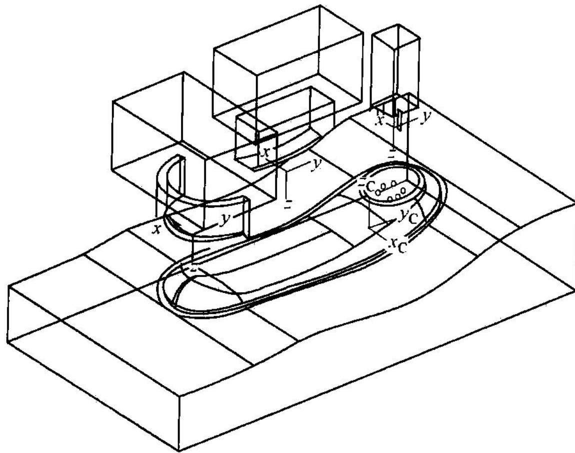


图 6-36　自动设计的一些电极

图 6-37 所示为另一个加工手机外壳型芯设计的一些电极的例子。为了能完整的加工该模具，需要用 40 多个电极。用通用功能的 CAD/CAM 来设计这些电极，需要花费超过 16 个小时。使用前面讨论过的电极设计方法，则电极可在很短的时间内完成设计。

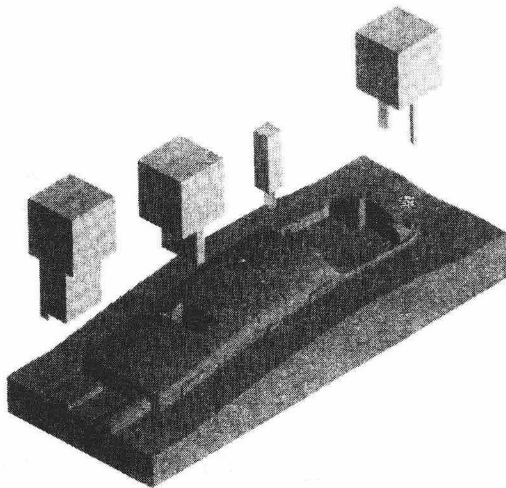


图 6-37　EDM 加工手机外壳模具的电极设计[45]

6.6 模具设计修改和刀具路径的更新

6.6.1 概述

在过去的数十年中，许多学者对刀具路径的生成方法进行研究[19,46,47]。他们对注射模和压铸模加工提出了统一的 CAM 系统结构。但是，对前期的刀具路径基础上如何有效地修改路径，以及如何频繁地修改模具设计，并未做过深入的研究。本节将讨论模具设计的修改问题，将叙述如何影响 NC 刀具路径的重新编程和生成。在编著本书时，还未有基于雕塑表面的刀具路径重新生成的研究报告。在刀具路径重新生成时，关于刀具定位（cutter location，CL）点的重新使用，也没有商业的 CAM 系统考虑过这个问题。

为了减少刀具路径重新生成所需的时间，本节将提出新的刀具路径重生成方法[48]。可以利用已生成的 CL 点来修改模具设计。这种方法能先判断受影响的 CL 点，并且将其撤去。随后计算出新的 CL 点来替代移除的那个。而那些未受影响的 CL 点则保留到新的 CL 点数据中。因此只有影响刀具路径的点，需要被重新计算。对于需要修改工件，新刀具路径可以高效地重新生成。刀具路径修改的算法已在多个工业部分测试，取得了一定的进展。

大多数模具加工都采用 3 轴 CNC 机床，用球头立式铣刀来精加工雕塑表面。因此，本节将侧重对此种配置来生成刀具路径的讨论。研究的前题是原来的工件由于设计改变而修改区域和它的边界已经被判断，刀具路径也会被计算，此外加工修改过的工件的刀具尺寸与原来工件的刀具是一样的。

6.6.2 基本概念和理论

在研究刀具路径重新生成之前，先介绍下一些刀具生成的概念和理论。为了高效地重新生成刀具路径，要先判断出受影响的 CL 刀具定位点。受影响的 CL 点的判断与刀具路径的拓扑有关，这也将在本节中讨论。

1. CC 点，CL 点和刀具中心点

任意点 $\boldsymbol{P}$（u，v）上的表面法线 $\boldsymbol{n}$ 可表述为：

$$\boldsymbol{n} = \frac{\boldsymbol{r}_u \times \boldsymbol{r}_v}{|\boldsymbol{r}_u \times \boldsymbol{r}_v|} \tag{6-11}$$

式中　$\boldsymbol{r}_u$ 和 $\boldsymbol{r}_v$——在表面 $\boldsymbol{r}$ 上并经过点 P 沿 u 和 v 方向上的导数。

对于球头立式铣刀，令 $\boldsymbol{P}_{cc}$为刀具的接触点（CC），R 为刀具的半径，$\boldsymbol{n}$ 为表面法线，$\boldsymbol{T}$ =（0，0，1）是与 z 轴平行的刀具轴，刀具中心点（$\boldsymbol{P}_c$）在工件的偏置表面上，由下式给出

$$P_c = P_{cc} + R_n \tag{6-12}$$

刀具定位（CL）点P_{cl}用下式计算

$$P_{cl} = P_c - RT \tag{6-13}$$

可以从式（6-13）中发现，一个CL点的x值和y值与相应的刀具中心点的值相同。在3轴加工中，如果表面法向矢量n指向$-z$轴方向，则表面不能加工。因此，假设所有的表面法向矢量都指向$+z$轴方向，即$(T \cdot n) > 0$。

2. 刀具路径生成

如前所讨论，对于3轴CNC加工刀具路径的生成方法，可分为五种类型：等同参量法（ISO-parametric method）[49]、恒定扇形法（constant scallop method）[50]、平行刀具法（parallel tool path method）[46]、CC点法（CC-point method）[16]和Z-图形法（Z-map method）[19]。等同参量法和恒定扇形法，对于复杂表面很难生成连续的刀具路径。用平行刀具法、CC点法和Z-图形法所生成的刀具路径线通常与平面或直线平行，对于复杂表面也可生成连续的刀具路径。因此这些方法都被广泛的用于模具加工中。在本节中假设刀具路径是使用这三种方法中的一种来生成的。

6.6.3 建议算法

按CL点的概念，如果修改区域的边界C是无干涉的，会影响到CL点的识别。相应的CL点形成一个封闭的并且包围所有受影响CL点的边界C_0。留在C_0之外的CL点则没有受到修改的影响。

为了提供更容易方法，用平行刀具路径法生成刀具路径。刀具路径线与x轴平行，即相同刀具路径行上的CL点的y值都相等。

1. 刀具路径重新生成的框架

图6-38所示为刀具路径重生成的算法。输入是修改区域边界C、刀具参数、工件和CL点文件f_{old}，它储存着修改前的CL点。输出是CL文件f_{new}，储存着修改工件的新CL点。然后依据C来算出受影响CL点的边界，并计算C_0的极限y值的y_{min}和y_{max}。读出f_{old}中的CL点，并作识别。如果CL点没有受影响，直接输出到f_{new}。反之，将用新的CL点来代替。f_{old}中的CL点会被逐个检查，直到所有的CL点被识别完成。

2. 从C中创建C_0

为了确保所有受影响的CL点都包围在C_0内，C必须是非干涉。但是，在实际中C中可能存在干涉点，因此必须对C进行干涉检测。如果存在干涉点，就需要创建新的非干涉边界C'来替代原来的C。许多学者已经对干涉检测的问题进行了研究，这里就再展开。如Ding[26]的算法，能用来检测干涉，并判断非干涉边界。在干涉检测之后，要在非干涉边界的基础上计算出C_0，过程如下。

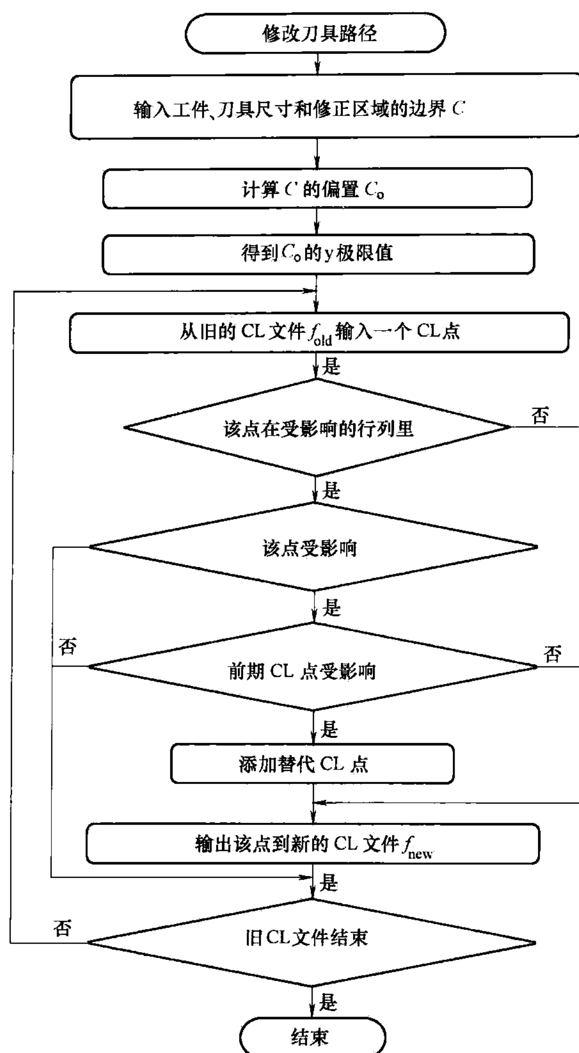


图 6-38　刀具路径修改流程框

1）识别 C' 每条曲线所属的表面。

2）由给定公差对每条曲线上的点进行取样。

3）计算表面上每个点的法线 $\boldsymbol{n}$。

4）计算 CL 点。

5）连接 CL 点，形成 C_0。

修改区域的边界可能不止一个，这些曲线可能属于不同表面。为了对每条曲线上的每个点计算出 CL 点，先要判断出含有该点的表面。由所给公差对每条曲

线上的点进行取样。每个点所在单位表面法向矢量 $\boldsymbol{n}$，可用式（6-11）计算。用式（6-13）算出相应的 CL 点。连接所有刀具定位 CL 点，即创建完成 C_0。

3. 判断受影响的 CL 点

计算 C_0 的极限 y 值 y_{min}和 y_{max}，随后与 CL 点的 y 值进行比较。在刀具路径行（tool path row）中，很容易判断 CL 点是受影响（$y_{min} < y < y_{max}$）；或者不受影响（$y > y_{max}$或 $y < y_{min}$）。如果 CL 点不在受影响路径行中，则直接输出到f_{new}中。

如图 6-39 所示，对于受影响的刀具路径行，可能只有一些 CL 点受到影响，而且受影响的 CL 点被两个极限点所包围。由于在同一路径行上所有 CL 点的 y 值是相同的，所以可以 C_0 与平面 $Y = y$ 相交来计算这两个极限点，其中 y 是刀具路径行的 y 值。此外，对于非层面的刀具路径，所给定的（x，y）值只会有一个 z 值。所以可用两个相交点的 x 值，x_{min}和 x_{max}来判断 CL 点是否受到影响。如果 CL 点的 x 值在 x_{min}和 x_{max}的范围中，则是受影响的刀具定位 CL 点，必须被去除。反之，则可用于加工修改过的工件。

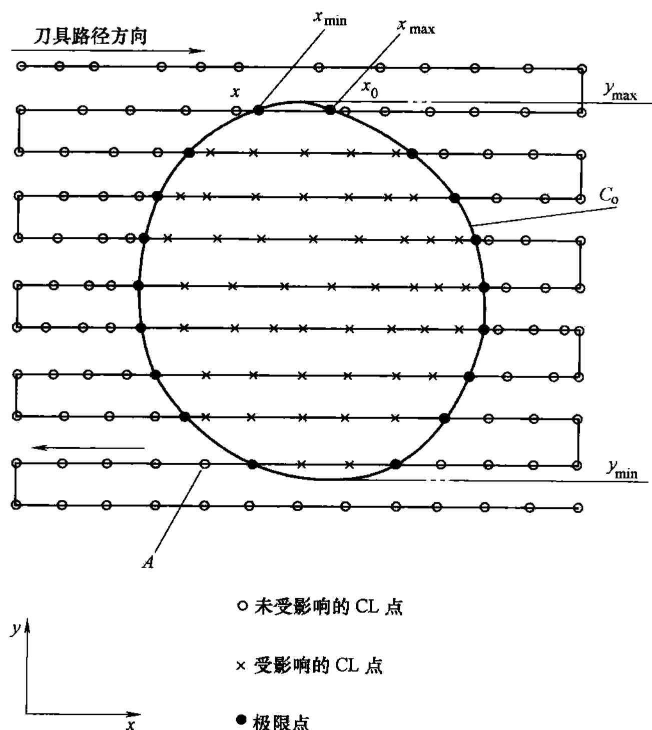


图 6-39　极限点和一些作用点

当判断到受影响的路径中的 CL 点未受影响时，会存在两种情况：①是已判断路径行中受影响的 CL 点；②已判断路径行中检测出未受影响的 CL 点。第一

种情况，表示所有的在路径行中受影响 CL 点被检测并被去除，如图 6-39 中点 A。新的刀具定位 CL 点要添加到以前的 CL 点之中。

第二种情况，可通过比较绝对值 $|x - x_0|$ 和 $|x_{max} - x_{min}|$，进一步分成两种情况。其中 x 是当前 CL 点的 x 值，x_0 是以前路径行里 x 值。它接近于当前的 CL 点，并被判断未受影响。如果 $|x - x_0| < |x_{max} - x_{min}|$，CL 点不需要添加到以前的 CL 点之中。相反如果 $|x - x_0| \geqslant |x_{max} - x_{min}|$，新的 CL 点需要被加入。当修改以前的工件轮廓相对较窄时，会出现后一种情况。在平面（$Y = y$）和 C_0 的两交点之间，不存在 CL 点。

4. 替代受影响的 CL 点

去除受影响的 CL 点后，它们必须用新的 CL 点替代。新的 CL 点 y 值，与去除的 CL 点值相同。由于修改区域的轮廓与原来的工件不一样，新生成的 CL 点的 x 值会与去除的不相同，它们必须根据加工公差来计算。

根据所给 x、y 值，用 Z-图形法来计算新 CL 点的 z 轴值。沿 z 轴移动刀具直到刀具平面与工件相切。如图 6-40 所示，算出点（x_0，y，z_0）并使其成为 CL 点后，用 x_1（$=x_0+\delta$）和 x（$=x_0+\delta/2$）来分别算出 z_1 和 z 值。经过点（x_0，y，z_0）和点（x_1，y，z_1）线段中心点 z 向的 z'值，由（$z' = (z_0 + z_1)/2$）算出。如果 z 和 z'之间的差值，在所给的公差 ε 的范围内，则点（x_1，y，z_1）成为新的 CL 点。反之，将 δ 值缩短一半，直到新的点满足所给的公差。

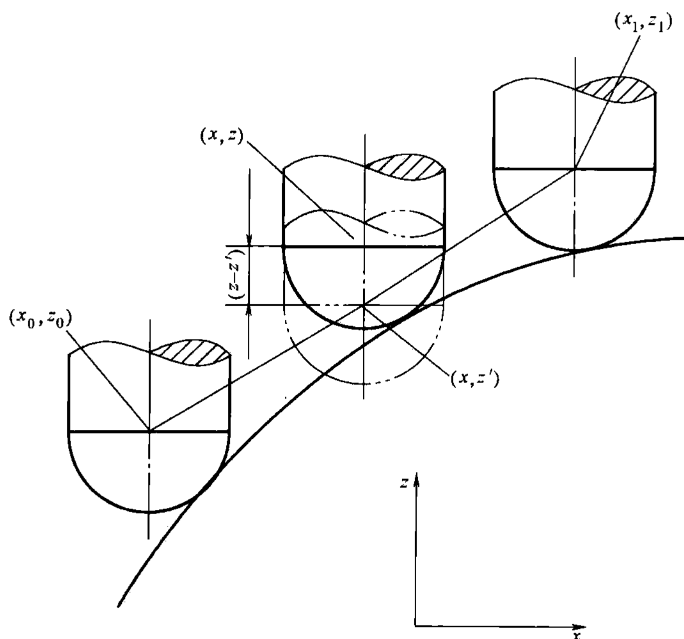
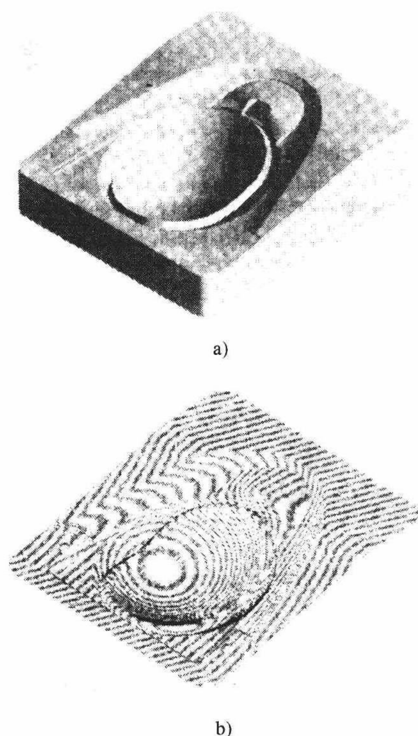


图 6-40 z 和 z'之间的区别

6.6.4　示例说明

刀具路径的修改算法已经在多个工业部门进行过测试。图 6-41a 为阶梯模板。在原来模具中有 219 个修剪雕塑表面，加工的表面面积为 191 215mm²。如图 6-42a 所示，在模具中加入一些材料，所加的表面面积为 907mm²。图 6-41b 所示为原来阶梯模板的刀具路径，它是使用商业 CAM 软件 Unigraphics[51] 生成的。其加工参量如下：球头立式铣刀的半径为 5mm、刀具路径加工公差为 0.01mm、扇形齿高为 0.03mm。用平行刀具路径法生成刀具路径，在 HP C240 工作站生成刀具路径只需 10min。图 6-42b 所示为使用新开发刀具路径修改算法，修改模用的替代点后生成的新刀具路径。新旧的刀具路径用的是相同的加工参量。新路径使用相同计算机辅助只需 3s 就能判断出受影响和未受影响的 CL 点。从放大图 6-42b 中可看到新刀具路径是非层面和光滑的。在图 6-42c 上能比较具有替代点前与修改之后的刀具路径。



a)

b)

图 6-41　修改前的阶梯模板及其生成的刀具路径

a）修改前的阶梯模板　b）修改前的阶梯模板上生成的刀具路径

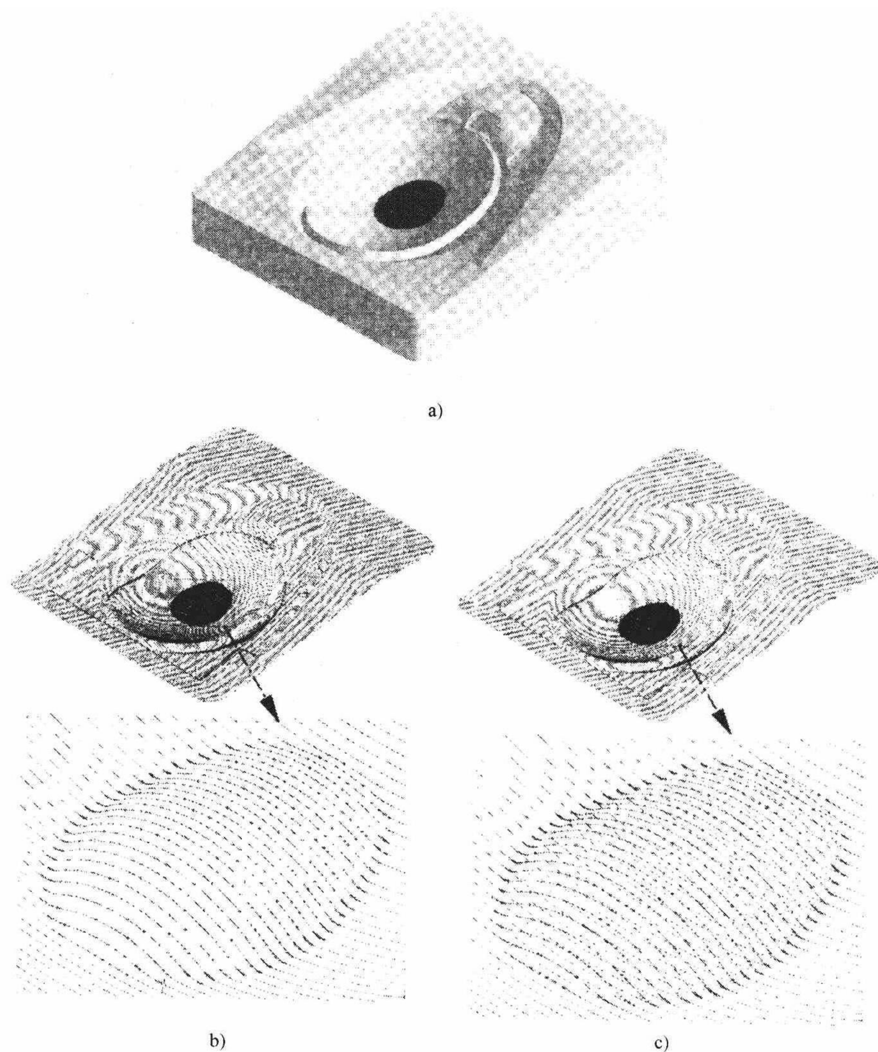


图 6-42 修改后的阶梯模板及其生成的刀具路径

a）修改后的阶梯模板 b）修改后由替代点重新生成的刀具路径

c）具有替代点前和修改之后的刀具路径

6.7 综述

具有雕塑表面的复杂模具的加工是一项难度很高的任务。有许多学者都进行过研究。然而，大多数的商业 CAD/CAM 系统不能生成刀具路径，除非用户能选择合适的刀具。本章主要阐述了在模具加工中检测干涉、自动选择刀具和设计

EDM 电极的方法。对执行过程中的定理、算法和编码都进行了详细的讨论，并通过几个工业领域中实例，说明了复杂模具加工方法的局限性。

本章最后阐述在模具设计被修改后基于前一个刀具路径来重新生成路径的算法。用这种算法，当模具轮廓被修改后仅通过对修改区域的 CL 点的计算，即有高效生成修改后工件的新刀具路径。因此，能明显减少 NC 重新编程中错误。研究报告中的方法，能够为模具设计修改高效地重新生成非层面的刀具路径。

参考文献

[1] B. K. Choi, D. H. Kim, and R. B. Jerard, "C-space approach to tool path generation for die and mold machining", Computer-Aided Design, 29, pp.657-669, 1997.

[2] T. Maekawa, "An overview of offset curves and surfaces", Computer-Aided Design, 31, pp.165-173, 1999.

[3] W. Tiller and E. G. Hanson, "Offsets of two-dimensional profiles", IEEE Computer Graphic Application, 4(9), pp.36-46, 1984.

[4] Y. S. Suh, and K. Lee, "NC milling tool path generation for arbitrary pockets defined by sculptured surfaces", Computer-Aided Design, 22, pp.273-284, 1990.

[5] A. Hansen and F. Arbab, "An algorithm for generating NC tool paths for arbitrarily shaped pockets with islands", ACM Transactions on Graphics, 11, pp.152-182, 1992.

[6] T. Maekawa and N. M. Patrikalakis, "Interrogation of differential geometry properties for design and manufacture", The Visual Computer, 10, pp.216-237, 1994.

[7] Y. J. Chen, and B. Ravani, "Offset surface generation and contouring in computer-aided design", Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, ASME Transactions, 109(3), pp.133-142, 1987.

[8] S. Aomura, and T. Uehara, "Self-intersection of an offset surface", Computer-Aided Design, 22 (7), pp.417-422, 1990.

[9] Y. Wang, "Intersection of offsets of parametric surfaces", Computer-Aided Geometric Design, 13, pp.453-465, 1996.

[10] T. Maekawa T., W. Cho and N.M. Patrikalakis, "Computation of self-intersection of offsets of Bezier surface patches", Transactions of the ASME, J of Mechanical Design, Vol.119, 275-283, 1997.

[11] K.K. George and N.R. Babu, "On the effective tool path planning algorithms for sculptured surface manufacture", J of Computers and Industrial Engineering, 28, pp.823-838, 1995.

[12] K.I. Kim. and K. Kim, "A new machine strategy for sculptured surfaces using offset surface", Int'l J. of Production Research, 33, pp.1683-1697, 1995.

[13] J.Y. Lai and D.J. Wang, "A strategy for finish cutting path generation of compound surfaces", Computers in Industry, 25, pp.189-209, 1994.

[14] A. Seiler, V. Balendran and K. Sivayoganathan, "Tool interference detection and avoidance based on offset nets", Int'l J of Machine Tools and Manufacturing, 37, pp.717-722, 1997.

[15] K. Tang, C.C. Cheng and Y. Dayan, "Offsetting surface boundaries and 3-axis gouge-free surface machining", Computer-Aided Design, 27, pp.915-927, 1995.

[16] B.K. Choi and C.S. Jun, "Ball-end cutter interference avoidance in NC machining of sculptured surfaces", Computer-Aided Design, 21, pp.371-378, 1989.

[17] Y. Takeuchi, M. Sakamoto, Y. Abe, and R. Orita, "Development of a personal CAD/CAM system for mold manufacture based on solid modeling techniques", Annals of the CIRP, 38(1), pp.429-432, 1989.

[18] Y. Mizugaki, M. Hao, M. Sakamoto, H. Makino, "Optimal tool selection based on genetic algorithm in a geometric cutting simulation", Annals of CIRP, 43, pp.433-436, 1994.

[19] A.C. Lin and H.T. Liu, "Automatic generation of NC cutter path from massive data points", Computer-Aided Design, 30 (1), pp.79-90, 1998.

[20] J.P. Duncan and S.G. Mair, "Sculptured surfaces in engineering and medicine", Cambridge University Press, Cambridge, 1983, pp. 3-126.

[21] J.S. Hwang, "Interference-free tool-path generation in the NC machining of parametric compound surfaces", Computer-Aided Design, 24, pp.667-676, 1992.

[22] J.S. Hwang and T.C. Chang, "Three axis machining of compound surfaces using flat and filleted end-mills", Computer-Aided Design, 30, pp.641-647, 1998.

[23] D.C.H. Yang and Z. Han, "Interference detection and optimal tool selection in 3-axis NC machining of free-form surfaces", Computer-Aided Design, 31, pp.303-315, 1999.

[24] H. Pottmann, J. Wallner, G. Glaeser, and B. Ravani, "Geometric criteria for gouge-free three-axis milling of sculptured surfaces", Transactions of the ASME, J of Mechanical Design, 121, pp.241-248, 1999.

[25] G. Glaeser, J. Wallner and H. Pottmann, "Collision-free 3-axis milling and selection of cutting tools", Computer-Aided Design, 31, pp.225-232, 1999.

[26] X.M. Ding, Computer-aided cutter selection and electrode design for mold machining, PhD dissertation, National University of Singapore, 2001, pp. 47-73.

[27] X.M. Ding, J.Y.H. Fuh and K.S. Lee, " Interference detection for 3-Axis mold machining", Computer-Aided Design, 33, pp.561-569, 2001.

[28] T.W. Sederberg, H.N. Christiansen and S. Katz, "Improved test for closed loops in surface intersections", Computer-Aided Design, 21, pp.505-508, 1989.

[29] T.J. Willmore, "An introduction to differential geometry", Clarendon Press, Oxford, 1959, pp. 31-94.

[30] M. Bala, M. and T.C. Chang, "Automatic cutter selection and optimal cutter path generation for prismatic parts", Int'l J of Production Research, 29, pp.2163-2176, 1991.

[31] Y.S. Lee, B.K. Choi and T.C. Chang, "Cutter distribution and cutter selection for sculptured surface cavity machining", Int'l J of Production Research, 30, pp.1447-1470, 1992.

[32] K. Yamazaki, Y. Kawaharh, J.C. Jeng, and H. Aoyama, "Autonomous process planning with real-time machining for productive sculptured surface manufacturing based on automatic recognition of geometric features", Annals of the CIRP, 44, pp.439-444, 1995.

[33] K. Lee, T.J. Kim and S.E. Hong, "Generation of toolpath with selection of proper tools for rough cutting process", Computer-Aided Design, 26, pp.822-831, 1994.

[34] D. Veeramani and Y.S. Gau, "Selection of an optimal set of cutting-tool sizes for 2.5D pocket machining", Computer-Aided Design, 29, pp.869-877, 1997.

[35] Y.H. Chen, Y.S. Lee and S.C. Fang, "Optimal cutter selection and machining plane determination for process planning and NC machining of complex surfaces", J of Manufacturing Systems, 17, pp.371-388, 1998.

[36] Y.M. Kyoung, K.K. Cho, and C.S. Jun, "Optimal tool selection for pocket machining in process planning", J. of Computers & Industrial Engineering, 33, pp.505-508, 1997.

[37] N. Mohri, M. Suzuki, M. Furuya, and N. Saito, "Electrode wear process in electrical discharge machining", Annals of the CIRP, 44, pp.165-168, 1995.

[38] P.M. Lonardo and A.A. Bruzzone, "Effect of flushing and electrode material on die sinking EDM", Annals of the CIRP, 48(1), pp.123-126, 1999.

[39] J.P. Kruth, "Steps towards an integrated CAD/CAM system for mold design and manufacture: Anisotropic shrinkage, component library and link to NC machining and EDM", Annals of the CIRP, 35, pp.83-87, 1986.

[40] B. Lauwers and J.P. Kruth, "Computer aided process planning for EDM operations", J

of Manufacturing Systems, 13, pp.313-322, 1994.

[41] D.F. Dauw, "Geometrical simulation of the EDM die-sinking process", Annals of the CIRP, 37, pp.191-197, 1988.

[42] M. Kunieda, W. Kowaguchi and T. Takita, "Reverse simulation of die-sinking EDM", Annals of the CIRP, 48(1), pp.115-118, 1999.

[43] M. Bayramoglu and A.W. Duffill, "Manufacturing linear and circular contours using CNC EDM and frame type tools", Int'l J of Machine Tools and Manufacturing, 35, pp.1125-1136, 1995.

[44] Z.Y. Yu, T. Masuzawa and M. Fujino, "Micro-EDM for three-dimensional cavities: development of uniform wear method", Annals of CIRP, 47, pp.169-172, 1998.

[45] X.M. Ding, J.Y.H. Fuh, K.S. Lee, Y.F. Zhang, and A.Y.C. Nee, "A computer-aided EDM electrode design system for mold manufacturing", Int'l J of Production Research, 38, pp.3079-3092, 2000.

[46] J. E. Bobrow, "NC machine tool path generation from CSG part representations", Computer-Aided Design, Vol.17, pp. 69-76, 1985.

[47] B. K. Choi, Y. C. Chung, J. W. Park and D. H. Kim, Unified CAM-system architecture for die and mold manufacturing, Computer-Aided Design, Vol. 26, pp.235-243, 1994.

[48] L.P. Zhang, J.Y.H. Fuh and A.Y.C. Nee, "Tool path regeneration for mold design modification", Computer-Aided Design, Vol. 35, 813-823, 2003.

[49] G. C. Loney and T. M. Ozsoy, NC machining of free form surface, Computer-Aided Design, vol.19, pp.85-90, 1987.

[50] K. Suresh and D.C.H. Yang, Constant scallop-height machining of free-form surfaces, ASME J of Engineering for Industry, Vol.116, pp.253-258, 1994.

[51] Unigraphics on-line documentation, Version 15.0, UG Solutions Inc., Maryland Heights, 1999.

第 7 章　计算机辅助模具制造的工艺规程

7.1　概述

在制造厂里，工艺规程的功能是建立工艺和工艺参量，按工序将毛坯加工成工程图所要求的工件。在制造领域，工艺规程确定的工艺包含了机床、刀具和装配等一系列决定性影响的因素，以及它们的顺序。在一些情况下，对每台机床操作中切削深度、进给速率和切割速度的选择也部分包括在工件的工艺规程中。由于计算机技术发展和生产周期缩短的需要，计算机辅助工艺规程 CAPP（computer-aided process planning）系统已经能帮助人工进行规划，并已经与 CAD 和 CAM 一起综合集成。近年来，在制品设计实践中，应用制造设计原理 DFM（design for manufacturing），也需要 CAPP 系统生成最好的工艺规程，对给定制品作生产制造评估。另一方面，在工具制造产业中，为了迎合客户紧迫的交货日程，制品计划者更需要强大和柔性的 CAPP 系统来适应动态规划的需求。

在最近 20 年，对于各种工件的制造范畴，诸如回转体和棱柱体零件，已经出现并开发了许多种 CAPP 系统。其自动化的程度从交互式、变异式到综合型系统[1]。本章将集中讨论综合型 CAPP 系统，因为它是最先进和最实用的。通常，在这些综合型 CAPP 系统中工艺规程的制定过程可概括成以下几点。

1）由加工特征来识别毛坯和工件，通常以 CAD 的实体模型描述为基础，毛坯和工件实体的差额部分就是需去除的材料量。提取总的去除量并分解成各部分，称为加工特征，如孔和槽等，可以用一些专门的机械加工方法，如钻削和铣削来完成对它们的加工。

2）按照每个加工特征选择加工工艺或工序，如粗加工和精加工等。

3）按照每个工艺选择机床和刀具，基于可得到的车间资源来指定使用的机床和刀具。

4）生成装夹计划，参照工件在机床工作台上的方位来完成各工序的装夹布置。首先拟定各工序刀具的对刀方位 TAD（tool approach direction），再设置通用的 TAD 和各工序的装夹固定。

一般情况下要先输出所设置的机床、刀具和装夹布置，再按顺序形成加工方案。为了找出可行的理想解决问题的方法，2）~4）项工作要同时进行。因为 4 项工作是相互关联的，不是各自独立的。从另一方面讲，工艺规程也是个优化的

问题。对2）~4）项中的每个决策，可行的方案看似很多，其实只有一个真正可行。寻求一个良好的解决问题的方案，总体上还是有广阔空间的。在过去几年中，大多数CAPP系统以线性的方式在总体上形成工艺规划，然后再分别对待每个确定的问题。但他们发现，工业界很少接受制定的工艺规程，经常远离或并不执行他们的规划。现在已经注意到，CAPP通过综合决策制定[2-8]，已经能在一定程度解决上面提到过的问题了。各种类型的生产车间，为开发综合型CAPP系统确定了现实的方向。

模具的制造在制造工业中是个重要的环节，它有两个特点：

1）模具的制造车间是典型的机械加工车间，通常备有所有常用的切削机床。模具的特种制造工件数量少于5个，但是工件的量是非常大的。

2）模具由大量的各种零件装配而成，如图7-1所示。大多数零部件都是标准件，模架和顶杆都可以直接购置。需要制造的零部件是型芯、型腔、侧滑块机构和内侧抽芯机构。

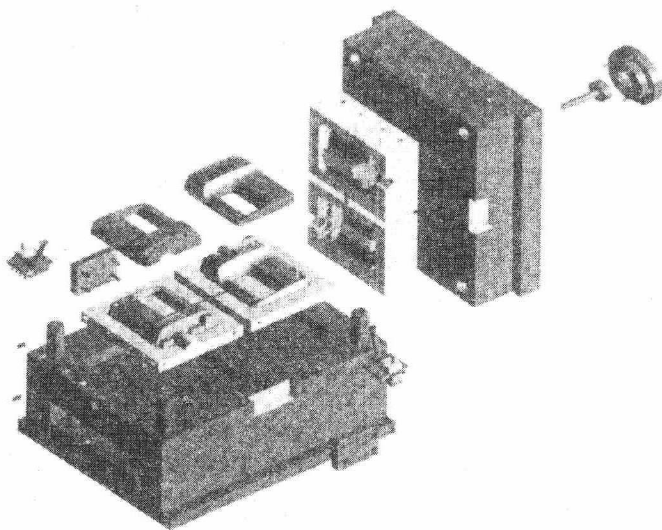


图7-1　装配的模具（新加坡Manusoft Technology许可）

从第一个特点可很明显看出，CAPP是模具制造车间所需要的。为了提高生产率，使CAPP与计划进度联结得更好，基于其第二个特点，需要实施CAPP的零部件是型芯、型腔、侧滑块机构和内侧向抽芯机构。型芯和型腔的制造进程中通常包括粗铣、精铣和EDM。3轴的粗铣和精铣可去除工件大部分材料，然后用EDM蚀除几何形状复杂且难于铣削的部分。另外，型芯和型腔的主要表面用NC

机床加工，其刀具的路径可以人工编制，但更适合用商品化的 CAM 软件。内侧抽芯机构需要选择和编排生产工艺。另一方面，侧滑块机构和内侧抽芯机构的种类和数量通常很多，同时，每个零件都需要不同的工艺、机床和刀具，滑块机构和内侧抽芯机构工艺规程的要求一般也是很高的，因此需要 CAPP 协助工艺设计者来完成各项工艺设计工作。在模具制造中，CAPP 的也能应用在滑块机构和内侧抽芯机构的制造中。

在本章中将首先阐述优化工艺规程的独特模式，简单介绍其在比较容易理解的模具制造业中的应用情况。这在参考文献［9］中，有更加深入的介绍。独特的 CAPP 与工业实际相结合来处理侧滑块和内侧抽芯机构制造的问题。其混合型 CAPP 系统正处于开发中，本章将结合实例与大家一起研究学习。

7.2 CAPP 优化模式的探讨

在 CAPP 系统中，工艺规程是按工件来定义的，也取决于其加工环境。这里假定工件几何体的实体模型由 CAD 软件创建，加工特征是可识别的。在机械加工环境范畴，CAPP 系统应该足够应对传统工作车间里的普通工件。这里讨论工作车间信息，包括其在机械加工方面能力及现在的状态，处理用户输入的开放组织结构，按照参数限止来获得精度和表面质量的技术属性，记录目前可用机床和刀具加工资源等。使用的机床包括常规的卧式和立式铣床、钻床和磨床，且有 CNC 加工中心。

在介绍工艺规程模式化之前，需要先定义一些术语。工艺有高与低两种程度不同层次的含义。从高层次来说，工艺一般定义为能够加工一个或几个加工特征的方法。在这一层次上，工艺称为工艺类型 PT（process type）。PT 的示例；如钻孔和端铣平面等。在低层次，工艺一般定义为对置于工作台上工件的加工，是与某机床和某刀具有关的加工方法。在这一层面的工艺称为工艺方法 PM（process method），能用机床/刀具/ TAD（M/T/TAD）来定义。在工艺规程中，包括了 PT 和 PM 两者。然而，在人工编制的工艺规程中，PT 和 PM 的划分界限并不是很清楚。目前的模型方法将这两种工艺看作是全面解决工艺规程结构中的二个不同阶段。其算法模式如下。

算法：解决方案的结构

输入：一系列加工特征和加工车间的信息设置（可用机床和刀具）。

输出：所需 PT 数目，对每个 PT 的所有可行的 PM_s（M/T/TAD）及 PT_s 之间的优先关系。

1）对于每个加工特征 F_i，基于车间加工能力的程度找到加工特征所有属性的 PT_s，包括形状、尺寸、公差和表面粗糙度。PT_s 的结果可表述为 $\sum PT_i =$

{($PT_{1\text{-}1}$, $PT_{1\text{-}2}$, …, $PT_{1\text{-}k}$), ($PT_{2\text{-}1}$, $PT_{2\text{-}2}$, …, $PT_{2\text{-}k}$), …, ($PT_{m\text{-}1}$, $PT_{m\text{-}2}$, …, $PT_{m\text{-}k}$)}，这里，m 是所有可行的设置，k 是每个 PT_s 要设置的数量。

2）在每个特征的设置中，同 PT_s 一样，认别所有先前特征之间关系 PR_s (precedence relationships)。在相关基准、装夹约束、几何参量关系和良好制造实例的基础上，定义这些 PR_s。

3）基于可用的机床和刀具，对每个在 $\sum PT$ 中的各个 PT，找到能实施所有机床 M_s 和刀具 T_s 的关联。对于每个 M 与 T 相联结，找到所有可实行的 TAD_s。

解决方案的结构算法结束

按照每个工艺类型 PT，对于制造工件所需要的一些 PT_s，由上述运算确定并输出一个或几个工艺方法 PM（M/T/TAD）。在 PT_s 之间关系 PR_s 也被清楚地表述出来。

下一步是从解决问题的方案中找到工艺规程，用 PM_s 中合适的结果对每个 PT 给出个 PM。很明显，所给问题中能有许多可行的解决方法，因此需要找到一个最好的计划。要完成这个任务必须首先建立对象功能，通常利用包括加工时间和成本的工艺规程评估标准。在这一阶段，由于一些刀具路径的详细信息和加工参量并不知道，所以加工时间和成本仅能估算。主要考虑机床更改的数量、设置的改变和刀具的变更，这些是可以精确计算的因素。在评估其他因素，如加工时间和费用等方面，Zhang 和 Nee[9] 提供了一些模式。

一旦建立了评价标准，就需要找到最好的解决方案，并形成搜寻的算法。通过查看解决问题的方案，很明显需要有一个优化算法。为解决这个难题，Zhang 和 Nee[9] 发展了两种改进搜寻的算法，分别应用了遗传算法（genetic algorithm）和减缓模拟（simulated annealing）。测试结果显示，两种算法能够高质量地解决问题。

下面几节将介绍这项成果用于解决侧向滑块和内侧抽芯机构的工艺规程模设计问题的情况。一些模具制造企业，也对其进行了适应目前制造实际的修改。

7.3 侧向滑块和内滑杆抽芯机构的 CAPP

7.3.1 侧向滑块和内滑杆抽芯机构的设计

过去的 20 年，在设计、制造和工程分析中计算机应用的优势，逐渐将模具设计从完全人工工艺设计变成计算机辅助工艺设计。采用一些商业化 CAD 工具，进一步推进了模具型芯和型腔设计的附加功能。然而，工艺设计从人工到计算机辅助的转变，远不及 CAD 基本功能给模具设计带来的变化大。用 CAD 设计模具的效率在很大程度上取决使用者的熟练程度。近期 CAD 工具在模具设计方面的

功效已经有所扩展，人们做了很多努力。类似 CAD 工具的 IMOLD，由新加坡国立大学开发。它以三维模型输入，提供了完全的功能模式，帮助使用者完成模具设计进程，从型芯和型腔创建到冷却系统和脱模机构的设计，可输出完整的三维模具，完成零部件的单独分离和装配集成的流程。IMOLD 显著的特征是参量模式化，配有侧向滑块和内侧滑杆抽芯机构的零部件设计模块。

图 7-2a 展现了典型的侧向滑块机构的总装。通常，侧向滑块机构的组成包括滑块体、滑块头部、支承板、导轨、锁紧楔块、斜导柱和制动定位装置。滑块头部按成型的轮廓成形，常与滑块体一起创建。斜导柱通过滑块体上下运动。导轨让滑块体移动，且只有一半能移出模架。防止滑块过度磨损，支承板呈矩形。制动锁紧楔提供了锁紧约束。定位装置上挡块阻止滑块超出其实际行程长度的位置。内侧滑杆抽芯机构总装如图 7-2b 所示，它组成包括滑杆体、滑杆头部、滑杆座、导向套和支承板。滑杆头部由成型轮廓成形，一般与滑块体一起创建。滑杆座在脱模顶出期间支承滑杆体。导向套提供滑杆体的移动方向。支承板是矩形板，用来防止滑块体的过度磨损。在侧向滑块和滑杆机构的零部件中，一般只有滑块体和滑杆体由普通工艺制造。所以，仅有这两种零部件编入扩展的 CAPP 系统。

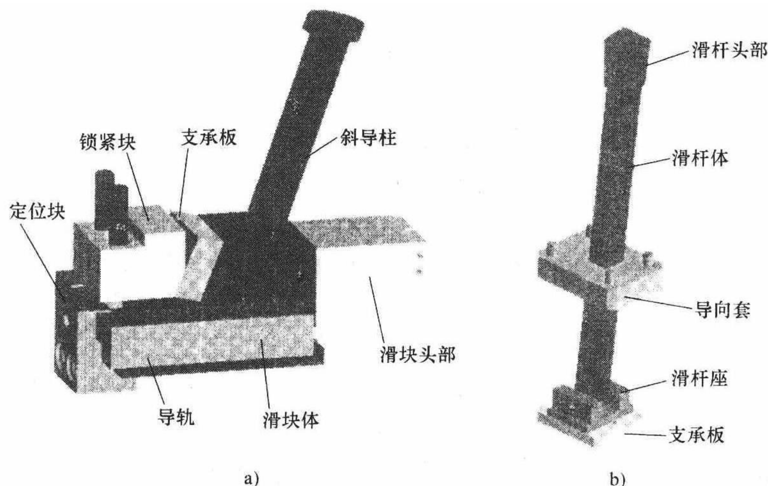


图 7-2 典型的侧向滑块和内侧滑杆抽芯机构的总装
a）侧向滑块机构 b）内侧滑杆抽芯机构

7.3.2 混合的 CAPP 处理方法

侧向滑块机构和/或内侧滑杆抽芯机构通常可以用不同方案设计。对于滑块/滑杆机构，不同的模具制造企业有各种不同的几何模型。然而我们注意，到一些专业工厂限定了滑块/滑杆机构几何模型种类的数目。为了提高设计和制造效率，

有规范设计标准的趋势。这种设计实际上参考“类似标准”的方法。图7-3展示了在模具企业里滑块体的常用类型。确定常用模型的类型要分解成型细节，这主要取决于成型参数。

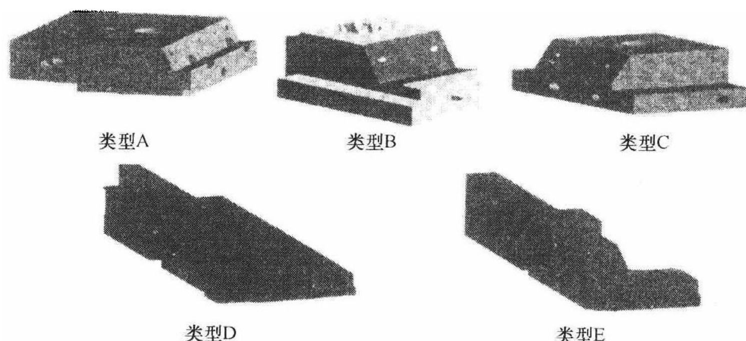


图7-3　某公司一些常用的滑块体[10]

在设计中，标准化限制了侧向滑块和滑杆抽芯机构的种类数目。这样也转而导致对每种侧向滑块和滑杆机构有相当定式的工艺规程。例如，在图7-3中的A类型滑块体，其典型的工艺规程如图7-4所示。然而，如果更为细致地研究工艺规程就可以发现，这里不只需要PT_s的规程和它们的次序，而且还需要确定每个PT而设置的PM_s。基于这些研究，一种混合的CAPP处理方法被用于滑块/滑杆机构。在高层次上，对于每种类型的滑块/滑杆机构的模式已建起程序化的PT_s。所构建的数据库称作规程模块（plan template）。在工艺规程中，每种滑块/滑杆机构的类型都被标上识标，它的工艺规程可以更换。在低层次上，适合采用在7.2节中介绍的优化方法，对于车间状态下可用加工资源，确定PT_s所有可行的PM_s。用优化的搜寻算法用来寻找最佳的工艺规程，即一个PM对应一个PT。CAPP处理方法的综合结构，如图7-5所示。希望通过混合处理，经广泛的搜索能找到高质量的适用工艺规程。另一方面，希望无须太大调整这处理方法就可以直接用于不同的模具制造企业。

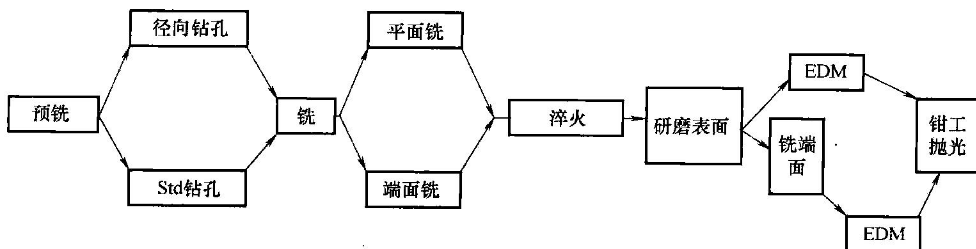


图7-4　典型滑块体的工艺流程[10]

7.3.3 工艺规程问题阐述

1. 提取特征参量

参见图7-5上阐述的第一步，识别滑块/滑杆的类型，提取模型上所有的功能特征参量。由于滑块/滑杆是实体模型，对前述任务要考虑特征识别可行的处理方法。观察图7-3中所示实体模型的基本几何特征，认识滑块的基本特征是不成问题的。然而对如图7-6所示的具有横切特征的一些滑杆体模型，则会带来一些问题。与此同时，用于注射模设计的，基于实体模型的CAD工具在市场上越来越多。在这些可用的CAD工具中，在滑块/滑杆设计中已经采用参量设计。滑块/滑杆的参量被直接存储在表述文件（expression file）中。在目前的方法中，表述文件一般作输入考虑。虽然这个方法没有应用在普通CAD工具中，但它已应用在许多模具设计CAD工具中。这里，以作为CAD工具之一的IMOLD来说明特征参量的提取过程。在IMOLD中，每个滑块/滑杆模型都有专门的参数模式。在选择专用模式时，用户在指定窗口迅速输入参数。这些参量被存储在表述文件中。图7-7a是图7-7b中滑块体的表述文件。既然每个变量在表述文件中被详细地定义，所以在专用的滑块/滑杆模式中识别所有特征参量并不困难。

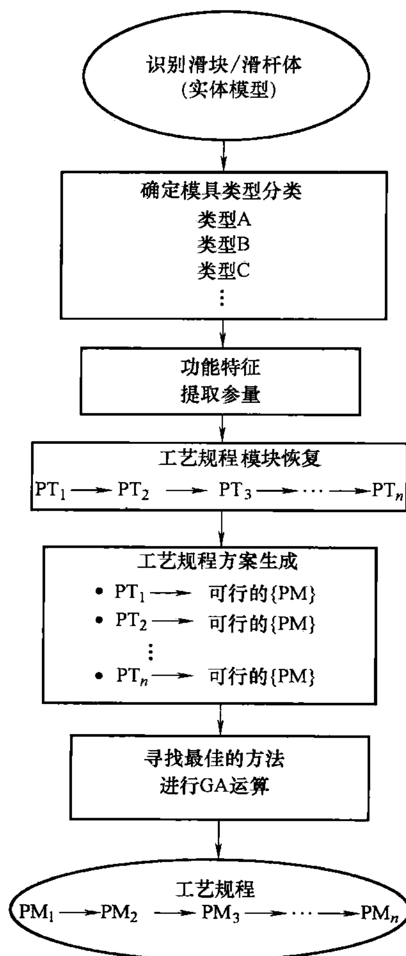


图7-5 混合扩展的CAPP处理方法

2. 识别所有可行的工艺方法

在识别滑块/滑杆模型类型和提取它的参量时，专门的工艺规程模块能重新得到目前的工艺类型 PT_s 程序设置。下一步是确认所有可行的工艺方法 PM_s。将可用资源基于技术考量可以建立解决工艺规程问题的方案。

工艺方法PM包括了加工机床、刀具和夹具装置。识别所有给定工艺类型

PT 的所有可用工艺方法 PM_s 是基于两个标准的。第一个标准是在工艺规程执行时这些切削机床、刀具和夹具必须是可用的。这类信息应由车间主任提供报告清单。用户需要更新数据库中的资源，指明可用的机床、刀具和夹具。第二个标准是对于工件和所需工艺类型 PT，工艺方法 PM 的加工能力必须有效。这些机床属性包括参数和达到精度的限制。这些机床的属性首先要与所需工艺类型 PT 的属性相比较。工件的参数决定加工机床是否合宜。针对此加工机床合适的刀具和夹具，完成所有可用工艺方法 PM_s 的识别。对整个工艺方法 PM_s 识别的过程，有如下说明。

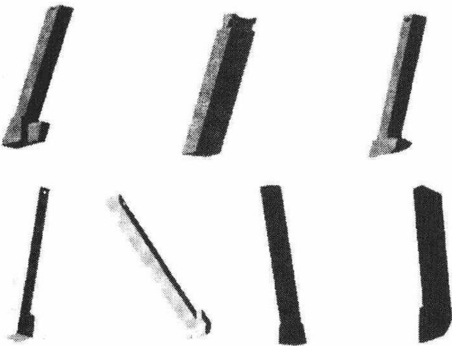
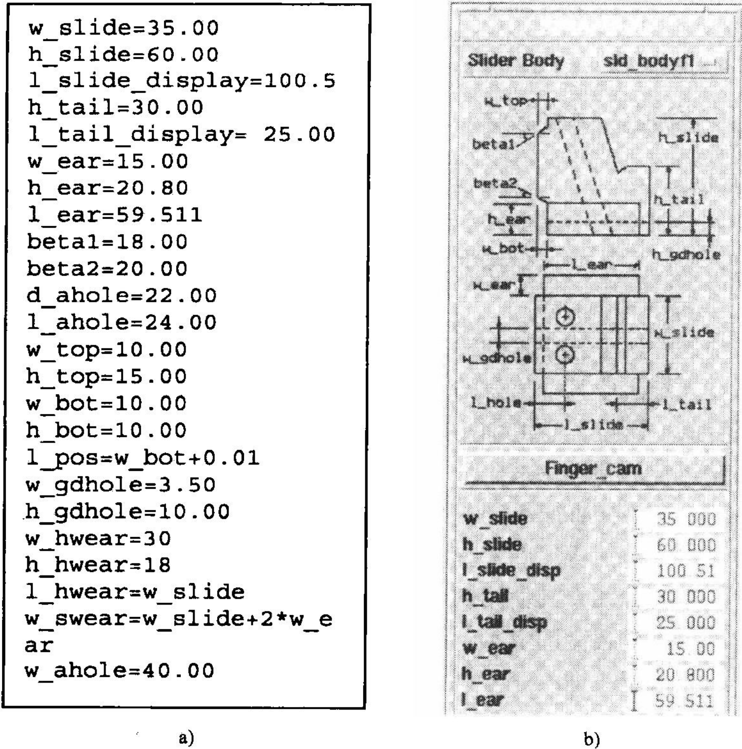


图 7-6　某公司一些常用的滑杆体[11]



```
w_slide=35.00
h_slide=60.00
l_slide_display=100.5
h_tail=30.00
l_tail_display= 25.00
w_ear=15.00
h_ear=20.80
l_ear=59.511
beta1=18.00
beta2=20.00
d_ahole=22.00
l_ahole=24.00
w_top=10.00
h_top=15.00
w_bot=10.00
h_bot=10.00
l_pos=w_bot+0.01
w_gdhole=3.50
h_gdhole=10.00
w_hwear=30
h_hwear=18
l_hwear=w_slide
w_swear=w_slide+2*w_e
ar
w_ahole=40.00
```


a)　　　　b)

图 7-7　滑块体的设计界面和它的表述文件[10]

算法：对于所用工艺类型 PT_s，识别所有工艺方法 PM_s

输入：按 $\{PT_1, PT_2, \cdots, PT_m\}$ 次序，设置工艺类型 PT_s 可用的机床、刀具和夹具

输出：对每个工艺类型 PT 的所有合宜的工艺方法 PM_s

1）取 PT_i $(i=1, m)$。

2）找到所有机床的可用的 PT_i，同时有足够参数和精度限制。将这些机床存储在 $\{M_1, M_2, \cdots, M_k\}$ 中。

3）取机床 M_j $(j=1, k)$。

4）找到所有刀具（T）和夹具装置（FD），它们能用来对 M_j 执行 PT_i，并将其存储组到 PM_i {M/T/FD} 中。

5）如果 $j<k$，运行3)。

6）如果 $i<m$，运行1)。

7）输出所有 PM_i {M/T/FD}，$i=1, m$

输出从上述算法生成的工艺规程解决方案 $\{PM_i\{M/T/FD\}, i=1, m\}$。对现有滑块/滑杆，从每个 PM_i 拾取 M/T/FD 组合，给出可行工艺规程。因此，常有多于一个的合宜工艺规程可供采用。在这种情况下渴望用优化技术来找到最佳的工艺规程。

7.3.4 工艺规程的优化技术

上节的最后，说明了工艺规程可能存在多种问题。另外，也有必要找一个理想的解决方案，即使它不是最好的。为了完成这项任务，必须建立评估标准。这里先介绍比较接近实际的评估标准，然后再介绍两种优化搜寻的算法。

1. 工艺规程的评估标准

目前常用的评估工艺规程的标准，包括加工时间最短和加工成本最低两个方面。考虑到在规划阶段某些信息的可用性，通常类似刀具路径和机床参量的详细信息不是现有的。所以，总的加工时间和成本必须经测评。Zhang 和 Nee[9] 提出了，对于一些已定的工艺方法，为估测工艺规程的加工成本要设置成本指数（cost indices）。将所有的花费分成两类，一类用于机床和刀具的成本，另一类取决于装夹的成本，包括机床的变换、同一台机床上夹具装置的改变及刀具的变换等。对于取决于机床和刀具使用的成本，假定每次使用专门机床和刀具的成本指数是常数。对于工件装夹的成本，当需要做个别装夹时，假定成本指数是常数。给定适宜的工艺规程，即有一系列的 MT/T/FD，以下五个方面的成本可以进行计算；机床使用、刀具运用、机床变换、设置的改变和刀具的变更。对棱柱形工件的工艺规程[9]，其成本估测程序表已经获得了认可。

在模具制造中，需要用最短的时间达到必需的标准。加工时间同样也可以被

分为两种类型：加工的时间和装夹的时间。对于取决于装夹的时间，假定各专门装夹所要的时间是一样的。有三种类型的时间因素，同一台机床的加工改变、夹具改变和刀具更改。这三个时间因素，可用以下方法来进行评估。

1）机床改变时间 *MCT*（machine change time）：当两个邻近的不同工艺方法 PM_s 之间需要变换时间。

$$MCT = MCTI \times \sum_{i=1}^{n-1} \Omega(M_{i+1} - M_i) \tag{7-1a}$$

$$\Omega(M_i - M_j) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } M_i \neq M_j \\ 0 & \text{如果 } M_i = M_j \end{cases} \tag{7-1b}$$

式中　n——工艺规程中的工艺方法 PM_s 总次数；

$MCTI$——机床改换的时间指数（machine change time index）；

M_i——对工艺方法 PM_i 的机床使用的指数 ID。

2）夹具变换时间 *FCT*（fixture change time）：在同一机床上，夹具装置需要改变时，两个邻接 PM_s 间需要变换夹具的时间。

$$FCT = SCTI \times \sum_{i=1}^{n-1} ((1 - \Omega(M_{i+1} - M_i)) \times \Omega(FD_{i+1} - FD_i)) \tag{7-2}$$

式中　$SCTI$——夹具装置变换时间指数（fixture device change time index）；

FD_i——对 PM_i 的所用夹具的 ID。

3）刀具改变时间 *TCT*（tool change time）：在同一台机床使用不同刀具时，两个邻近的 PM_s 间需要刀具更换刀具时间。

$$TCT = TCTI \times \sum_{i=1}^{n-1} ((1 - \Omega(M_{i+1} - M_i)) \times \Omega(T_{i+1} - T_i)) \tag{7-3}$$

式中　$TCTI$——刀具变更时间指数（tool change time index）。

不同的装夹时间，*MCTI*、*SCTI* 和 *TCTI* 能被模具制造车间提供。对于给定的工艺规程，装夹时间 T_{set-up} 是这三项的总和。

然而，加工进程时间的评测不仅是简单的结果。刀具路径和切削参量尚未确定，所以就需要找到每个工艺方法 PM 的近似加工时间。简单的方法就是将每台机床上各工序的材料切削率作为定额量。例如，对机床 M_i 施行表面铣削工序的材料切削率定义为 $R^i_{f\text{-mill}}$。作为结果，每台机床设定的材料切削速率必须对应所实施的工序。另一方面，对应工艺类型 PT_j 的材料切削体积 V_j 能被估测。给定一个工艺规程，总的加工时间 T_m 可以用以下方法进行评测：

$$T_m = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_j}{R^j_{PT_i}} \tag{7-4}$$

式中　n——PT_s 中的总次数；

$R^j_{PT_i}$——M_j 的材料切削率；

M_j——当前工艺规程中，被选定实行的工艺类型 PT_i。

在这种估测方法中假设材料切削速率是常数。对一台机床上行施的各工序的实际切削速率，与真实有些偏差。基于现有的研究，在车间里对不同机床完成相似工序，材料切削率的差别是很大的。另外，预期此假定不会明显影响加工刀具的选择。

最后，给定工艺规程的加工时间就是 $T_{set\text{-}up}$ 与 T_m 之和。在建立评估标准计划后，就需要寻找一种更好解决问题搜寻算法。对于每个 PT 可实行的 PM_s，找到最好的工艺规程是明显的组合问题，需要有个智能的搜寻算法。在下一节里将介绍遗传算法和减缓模拟这两种算法。

2. 遗传算法的优化探索方法

遗传算法 GA（genetic algorithm）起源自然发展和自然选择的随机搜寻技术。它先建立一个种群（population）的随机题解。在种群中的个体（individual）称为染色体（chromosome）。种群通过成功的迭代而进化，称它们为生成体（generations）。在评估染色体期间，它们的适应度（fitness）被检测。创建下一个生成体，新的染色体称为后代（off-spring）。它由两种操作形成，交叉（crossover，两个染色体的组合）和变异（mutation，修改染色体）。逐代（generation）选择过程，经受更多可能性选择，意味着染色体有较高的适应价值。在几个生成体后面，算法收敛于最好的染色体。有希望得到最佳或接近最佳的题解。应用遗传算法 GA，搜寻制造滑块/滑杆的最佳工艺规程。其实行的一般过程，由以下几段陈述。

1）染色体表述。Zhang 等人[12]将遗传算法 GA 应用到棱柱形工件工艺规程的制订中。它们的染色体的表述能运用在可行的规程中。每段染色体描述工艺规程的对应工艺方法 PM，再将段串联成工艺规程。

2）初始的种群生成体。可行的染色体表述规程对每个工艺类型 PT，能随机选择生成合适的 M/T/FD。相类似的其他染色体也能生成。

3）适应度函数（Fitness function）。对工艺规程中所有的加工时间处理成它的适应度。

4）选择。一般利用两种机制[11,12]进行选择。第一，用“精华”的选择，复制最低适应度的染色体。在染色体不增加时，保持最好的适应度。第二，能用几个选择机制，再生留存的染色体。例如，Zhang 等人[12]用“转盘”的方法。而 Alam[11]用指数排列的机制，克服了滚轮方法中的一些缺陷。

5）遗传算子（Genetic operators）在遗传算法 GA 的执行中，交叉作为遗传算子的重要手段，进行广泛的扩展研究。变异作为辅助的工具，在搜索空间里为实行密集细致的搜寻，促使引起的变化可能最小。

在 Zhang[12]发展的遗传算法 GA 时，由于依次改变其中所有的 PT_s，交叉算

子主要用在探测解决方案。在这里，PT_s 的次序在规程模块中固定，交叉能被优化。Alam[11]采用 Zhang 等人[12]的交叉算法，并以修改了算法顺序。这个算法可作如下描述。

①同时随机取两个 C-1 和 C-2 染色体。用给出的交叉 P_{cro}来决定是否应该发生。如果回答不是，那就停止使用。

②在所有串联位置中随机决定切入点。每串分成两部分，由切入点分成左边部分和右边部分。

③复制 C-1 染色体的左半部分，形成后代-1（offspring-1）的左边；复制 C-2 染色体右半部分，形成后代-1（offspring-1）的右边。相类似，复制 C-2 染色体的左半部分，形成后代-2（offspring-2）的左边；复制 C-2 染色体右半部分，形成后代-2（offspring-2）的右边。

这种交叉的作用会改变染色体中某个 PT_s 中 PM_s，但不会改变它们的顺序。

变异算子（mutation operation）一般改变染色体的一段或几段。这里，对于 PT 的多个工艺方法 PM_s，可用来探测解决方案。由于在工艺方法 PM 中有三个项目，可以采用两种不同的变异机制。第一种，分别对三个项目用三种变异算子[12]。第二种是仅用一种变异算子，作为单一组合来处理三个项目[11]。这两种机制没有本质上的不同，仅有的差别在变异速率 P_{mut}的选用。单一变异算子的算法陈述如下。

①取个染色体，随机选择它的 PT。如果需要改变这个 PT 中的 PM，对预定可能的变异速率 P_{mut}作出决定。

②从该 PT 的所有变化的 PM_s 中，随机选择一个 PM 替代现有的 PM。

以上是 GA 为基础的搜索算法的一些简单运用。此搜索算法在理论上，对 PT_s 改变的 PM_s 过程中，检测了整个解决问题方案。在寻找整体优化过程中，对创始算法 GA 的参量选择起重要的作用。以目前的经验，$P_{cro}=0.6\sim0.8$ 和 $P_{mut}=0.1\sim0.2$ 在合适时间段内得到了很好的转换[11]。另一方面，通常要以固定的生成体数量作为界限来中止搜索[12]（遗传算法（Genetic Algorithm）是模仿达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型，是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法，它最初由美国 Michigan 大学 J. Holland 教授于 1975 年首先提出来的，并出版了专著《Adaptation in Natural and Artificial Sys tems》。函数优化和组合优化是遗传算法的经典应用领域。遗传算法已经在求解生产管理、自动控制、图象处理和遗传编码等方面获得了广泛的运用。译者注。）

3. 减缓模拟的优化探索方法

除了遗传算法 GA 以外，对综合性问题还有几种探索算法才能找到优化题解。其中一种为基于减缓模拟 SA（simulated annealing）原理的探索算法。它常

与递减梯度的方法相结合。开始时用递减梯度的方法来随机解题，但并不有效。然后考虑初始题解中的少量变化。仅这些变化可导致接受更好的题解。它被逐次替代，直到没有变化时即获得了更好题解。用这种方法解题，常会遇到一些小的限制。为了解决这个问题，减缓模拟 SA 的原理能结合进了递减梯度算法。这个以 SA 为基础的递减梯度的探求方法，应用到目前的工艺规程设计中，能够寻找到优化的规程[9]。

减缓模拟 SA 已经应用在棱柱形工件的工艺规程中，详情可见参考文献[9]。这里，对于滑块/滑杆工艺规程所提供解题方案的一系列特性，做一些修改并获得合适的处理结果。基于 SA 算法的执行过程清晰，现陈述如下。

1）随机产生可行的规划（PM_1，PM_2，…，PM_n），称为当前规划（current plan）。这种方法与遗传算法中的随机染色体生成是一样的。建立初始温度 T_0。

2）当没有达到最终温度 T_{fin}时，用初始温度 $T = T_0$。

{

①将当前规划（current-plan）做随机改变。从当前规划中随机选择工艺类型 PT。以另一个随机的变换，替代它的工艺方法 PM。在改变以后，如果存在满意效果，用临时规划（temp-plan）取代原规划。

②计算当前规划(current-plan)E_1 和临时计划(temp-plan)E_2 的加工时间。

③IF $E_1 > E_2$

接受改变（用临时规划 E_2 替代当前规划 E_1）

ELSE

产生一个随机数字，X（$0 < X < 1$）

IF $X < e^{\frac{E_1 - E_2}{T}}$

接受改变

ELSE

拒绝改变

END IF

END IF

④重复①~③，直至达到满意的标准，当前规划 E_1 持续一定的次数。

⑤降低温度到按照冷却安排的新温度 T。举例，Szu[13] 建议的快速模拟安排减缓如下

$$\frac{T_t}{T_0} = \frac{1}{1 + t} \tag{7-5}$$

这里 t 是整数。

}

与遗传算法 GA 的应用相似，基于 SA 算法的参量 T_0 和 T_{fin} 必须仔细地选择，依次取得整体的优化题解。Zhang 和 Nee[9] 提出了选择这两个参数的基本方针。初始的温度 T_0 应该选择足够大，在随机地改变后趋缓最坏的加工时间增加。Boltzman 算法足以能导致规划进一步随机化。另一方面，最终的温度 T_{fin} 必须选择得足够低，使加工时间缩短到可被接受。在目前的工艺规程问题中，T_0 和 T_{fin} 必须与三个设定的时间指数相关联，即 *MCTI*、*SCTI* 和 *TCTI*。按 Zhang 和 Nee[9] 所提出的，T_0 和 T_{fin} 能设置为：$T_0 = 10 \times \mathrm{Max}(MCTI, SCTI, TCTI)$ 和 $T_{fin} = 0.25 \times \mathrm{Min}(MCTI, SCTI, TCTI)$。

7.3.5 讨论

本节介绍了滑块/滑杆的工艺规程混合处理方法和它的执行程序。对模具制造公司的滑块/滑杆设计和制造作了类似标准化的处理。与此同时，探索将机床、刀具和夹具组合的可行性修改，达到优化工艺规程的目标。对基于 GA 和 SA 的两种优化的探索算法分别作了介绍。源于加工车间的数据库也同样适合任何模具制造车间。有了滑块/滑杆的实体模型后，以此方法能得到具有最短加工时间的最佳工艺规程。

用这种方法的问题在于它是作为一个单独的系统来运作的。因此，它在所有的时间里都有最好的机械加工在进行，虽然在规划的开始阶段，用户需要对每台机床指明可用性。如果操作者安排完成的规划太迟，想给出精确信息是困难的。这样在生成的规划完成后，需要作些修改。可以理解，要解决这一问题，工艺规程的排定和综合是必需的。Zhang 等人[14] 开发了新颖的综合方法，实现了工艺规程的可用性。对滑块/滑杆工艺规程的处理方法，恰好能包含到这个综合方法之中。

7.4 系统的执行和示例

在 7.3 节主要介绍了模具制造中对滑块/滑杆工件推行混合法设计工艺规程的过程，详细叙述了执行程序。程序的执行要有注射模设计功能的 CAD 系统，侧向滑块/滑杆机构能用参量化模式进行设计。下面的几节将介绍由 Alam 等人[10,11] 开发的用来作为执行 CAPP 系统的 IMOLD-CAPP，并以实例来说明这种方法的功效。

7.4.1 IMOLD-CAPP 系统

IMOLD-CAPP 系统与 IMOLD V4 和 UG V15，都在 HP-UNIX 计算机工作站上开发运行。UG 是提供了很多功能的商用 CAD 系统，如 UG/Open-API 允许用户

开发个人所需的应用功能。IMOLD-CAPP 系统是通过 UG/Open-API 的 C 语言来编写的。用户图形界面 UGI（graphical user interface）是用 UI-Styler 开发的。

总共有五种功能模块已经建立：特征提取（feature extraction）、技术信息（technological information）、数据管理（database management）、遗传算法 GA（genetic algorithm）和图形模拟（graphic simulation）。如图 7-8 所示，菜单界面已经加入到 UG 主菜单。下拉菜单中的每项都对应功能模块，并有自己的对话框。

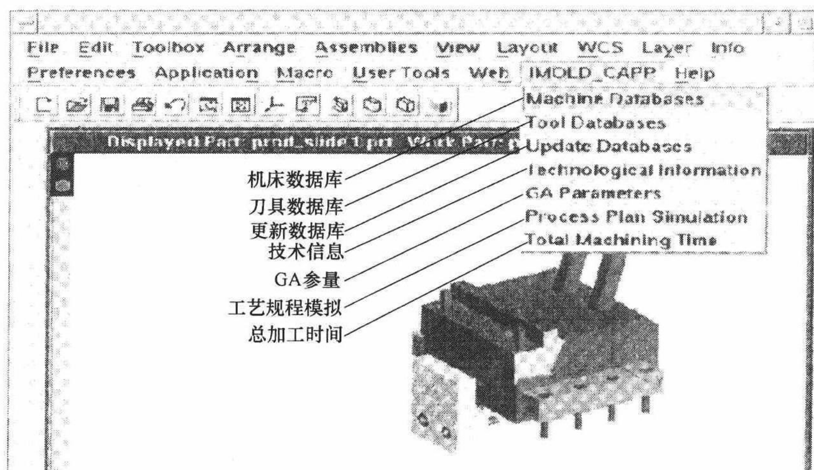


图 7-8　IMOLD-CAPP 系统的主菜单[11]

机床数据库和刀具数据库允许用户查看加工资源的信息。用户点击这些项目可获得关于特定机床的刀具和它们功能的信息。图 7-9 所示的对话框里有数据库关于 CNC 铣床立式铣刀的相关信息。更新数据库（update databases）允许用户添加一些新的机床资源，或者指出数据资源的不可使用之处。图 7-10 所示为 CNC 铣削加工的更新数据库。通过点击 CNC 铣削加工按钮调出对话框。打开 CNC 铣削数据库后，用户就可以修改和存储文件了。在菜单的技术信息项，允许用户输入表面粗糙度和尺寸公差等技术信息。它们不隶属于滑块/滑杆的几何模型。图 7-11a 所示的对话框，允许输入滑块体的技术参量。

GA 参量的菜单项允许用户修改默认的 GA 的技术参量。这些参量包括总体尺寸、生成体的最大数量、交叉速率和变异速率。大家注意到，变异被运用到了机床和刀具的加工中。图 7-11b 所示为 GA 参数的对话框。

工艺规程的模拟，允许用户观察到规程生成的每一步的图形显示。工件的直觉状态在每步规划后都会展示。图 7-12 展现了屏幕上的实例。

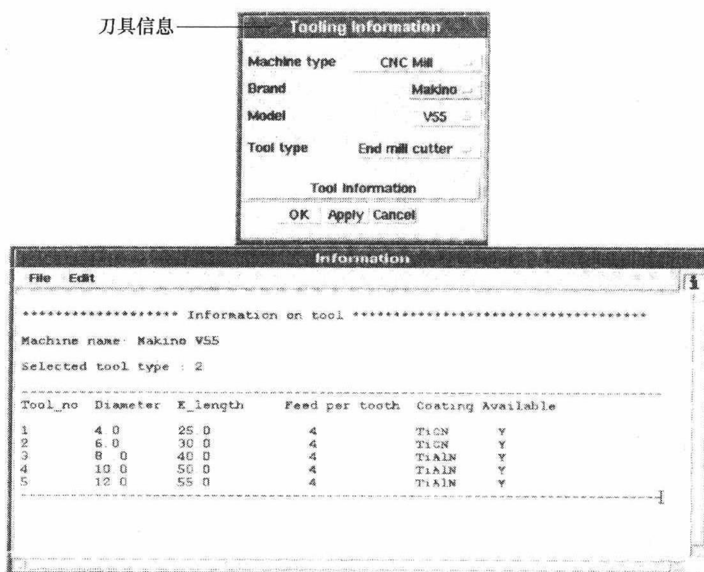


图 7-9　刀具数据库管理[11]

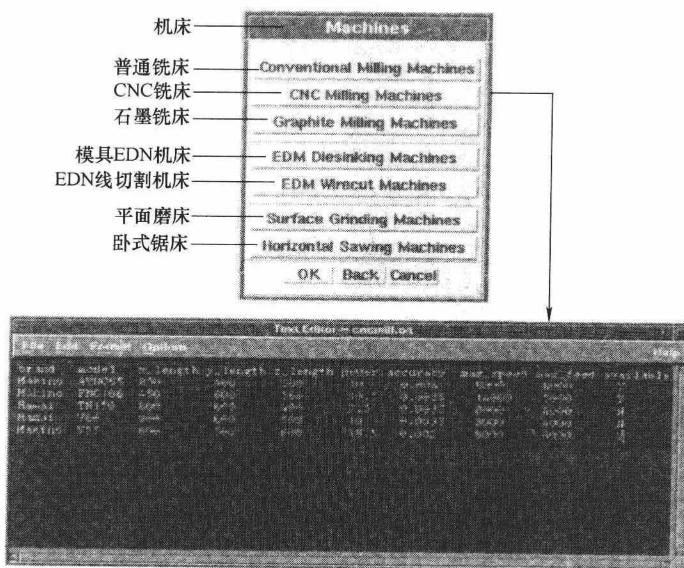


图 7-10　更新 CNC 铣削加工数据库[11]

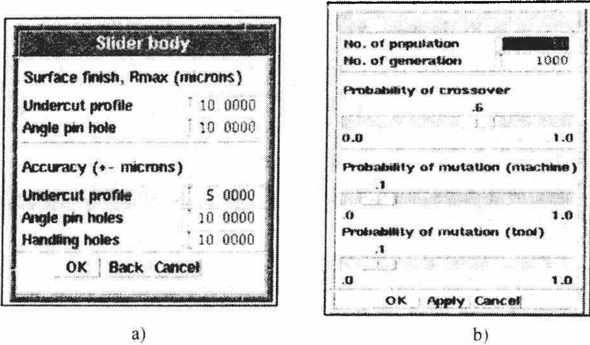


图 7-11 GA 参量和技术信息的对话框[11]

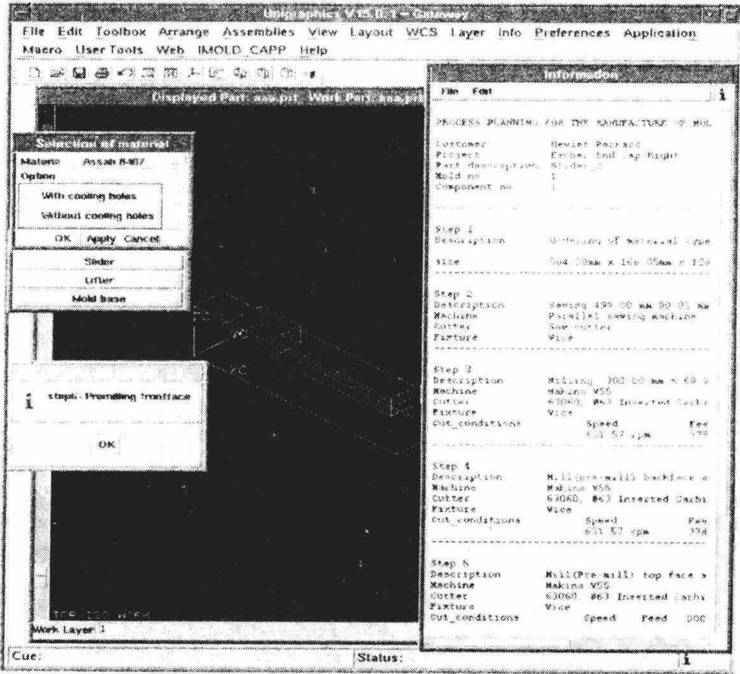


图 7-12 在屏幕上工艺规程的模拟[11]

7.4.2　示例

滑块体如图7-13中所示，该类型滑块用于成型在小型工件的较小表面。它包括如下几个特征：六个平面、四个斜面，在平面4和平面5上分别有两个装卸孔和三个装冷却管的平底孔，平面2和平面3各有两个台阶孔，平面5上的两个导轨面，平面4上有销钉孔，平面6上有装压板的三个螺栓通孔，平面1上有成型表面。成型表面粗糙度为$R_{max}=10\mu m$，斜导柱孔的粗糙度为$R_{max}=12\mu m$，以上两者的加工特征的默认精度值是$10\mu m$。

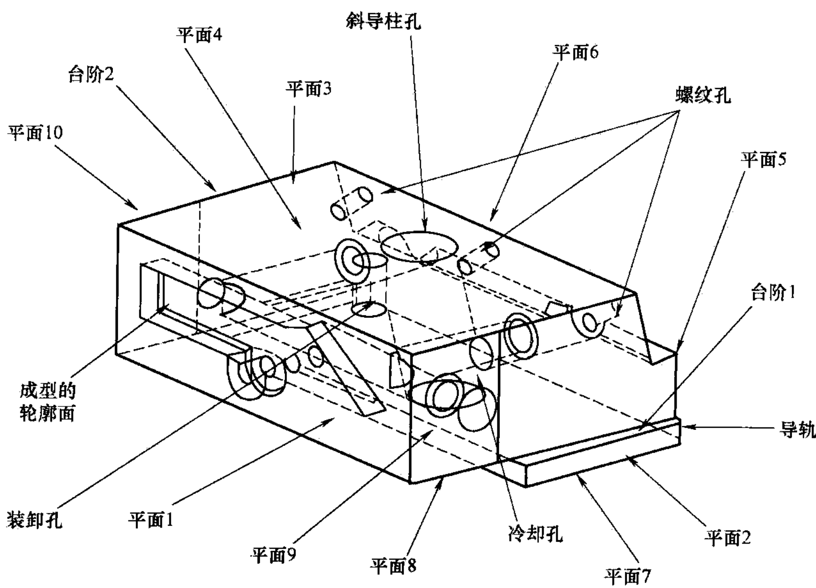


图7-13　具有所有加工特征的滑块[10]

选择的GA参量是$P_{cro}=0.8$和$P_{mut}=0.15$，尺寸总共有50个。生成体最大的数字设置是1000。在这些限制下，以GA为基础的搜寻算法能找到大多数最佳的加工时间。在表7-1中，展示了最终的工艺规程。

表7-1　滑块的一般工艺规程[10]

序号	工序	加工机床	刀具	夹具	图　示
1	预铣所有平面至比要求尺寸多0.2mm	Makino V55	平面铣刀	机床台钳	

（续）

序号	工序	加工机床	刀具	夹具	图　示
2	在平面 3 和平面 5 上钻冷却孔	深孔钻床	直径 10mm 钻头 直径 12.5mm 钻头及锥面加工	夹紧	
3	在平面 5 上钻装卸孔	Makino V55	直径 8.5mm 钻头 直径 12.5mm 钻头及丝锥	机床台钳	
4	铣平面 6，在平面 6 上钻攻螺纹孔	Makino V55	直径 32 平面铣刀 直径 5.2mm 钻头及 M6 丝锥	机床台钳斜夹	
5	在平面 2 上加工台阶和导轨面	Makino V55	直径 32mm 导轨面铣刀	机床台钳	
6	在平面 3 上加工台阶和导轨面	Makino V55	直径 32mm 导轨面铣刀	机床台钳	
7	在平面 4 上钻斜导柱孔	Makino V55	直径 11mm 钻头 直径 22mm 钻头	机床台钳	
8	垂直于平面 4 钻装卸孔	Makino V55	直径 8.5mm 钻头 M10 丝锥	机床台钳	
9	铣底部平面 7	Makino V55	直径 22mm 端铣刀	机床台钳斜夹	
10	预铣表面 1 轮廓	Makino V55	直径 12mm 端铣刀	机床台钳	

（续）

序号	工序	加工机床	刀具	夹具	图　示
11	研磨所有表面和台阶达到要求尺寸	MHT 平面磨床	磨削砂轮	电磁吸铁和台钳	
12	铣削电极轮廓	Makino SNC64 铣床	直径 12mm 端铣刀	Erowa 卡盘和台钳	
13	EDM 加工平面 1 上的成型轮廓	Makino EDNC43	石墨电极	电磁吸铁和爪式夹具	
14	抛光和钳工修整				

7.5 综述

注射模具包含很多种零部件。在这些零部件中，需要加工的主要是型芯、型腔、滑块体和滑杆。型芯和型腔的工艺规程较为明确易懂。因此，本章的讨论集中在滑块和滑杆的工艺规程的效果上。

工艺规程是个优化问题，它要在活动性和多元约束的联系中作出内在的决策。本章首先陈述了独特的工艺规程。它帮助人们汇集加工工件的路线和顺序任务，并据此获得最佳且完整的工艺规程。这种工艺规程的模式化方法，适用于滑块体和滑杆。基于工业实际的混合处理方法，开发了基本的规划模块。它在选择工艺类型和优化处理后选择工艺方法等方面有了长足进步。接着介绍了智能化的搜寻方法、遗传算法 GA 和减缓模拟算法 SA 等，在推行工艺规程模式的基础上，介绍寻找整体的优化方案。推行的方法已经在模具公司得以运用，通过了大量的滑块体和滑杆的加工验证，测试结果很令人满意。应用这种方法主要有如下两大优势。

（1）提出的方法是用模板作为起始点的。虽然似乎限制了工艺类型方案解决和顺序选择。但实际上，由于模具制造公司已经采用了准标化设计方法，所以消极影响有限。另一方面，在工艺方法选择的优化处理上，将来会更加扩大这种处

理方法的使用范围。

（2）这个发展系统能容易被其他公司购置使用。为此，仅需要创建该公司的规划模板，以及所用机床、刀具和夹具发展数据库。

这种方法受到加工特征识别的限制，只能在 IMOLD 系统所生成的模型上执行。今后会研发更强的特征识别系统，用于常规的滑块和滑杆对象生成的 B-rep 模式。

参考文献

[1] L. Alting and H.C. Zhang, "Computer-aided process planning: the state-of-the-art survey", International J of Production Research, Vol. 27, No. 4, pp. 553-585, 1989.

[2] C.L.P. Chen and S.R. LeClair, "Integration of design and manufacturing: solving set-up generation and feature sequencing using an unsupervised-learning approach", Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 1, pp. 59-75, 1994.

[3] C.C. P. Chu, C.C. P. and R. Gadh, "Feature-based approach for set-up minimization of process design from product design", Computer-Aided Design, Vol. 28, No. 5, pp. 321-332, 1996.

[4] D. Yip-Hoi and D. Dutta, "A genetic algorithm application for sequencing operations in process planning for parallel machining", IIE Transactions, Vol. 28, pp. 55-68, 1996.

[5] C.C. Hayes, "P^3: A process planner for manufacturability analysis", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 2, pp. 220-234, 1996.

[6] S. K. Gupta, "Using manufacturing planning to generate manufacturability feedback", J of Mechanical Design, Vol. 119, pp. 73-80, 1997.

[7] J. Chen, Y.F. Zhang, and A.Y.C. Nee, "Set-up planning using Hopfield Net and Simulated Annealing", International J of Production Research, Vol. 36, No. 4, pp. 981-1000, 1998.

[8] G.H. Ma, An Automated Process Planning System for Prismatic Parts, M.Eng. thesis, National University of Singapore, 1999.

[9] Y.F. Zhang and A.Y.C. Nee, "Application of genetic algorithms and simulated annealing in process planning optimization", Computational Intelligence in Manufacturing Handbook, edited by J. Wand and A. Kusiak, Boca Raton, FL: CRC Press LLC, pp. 9:1-24, 2001.

[10] M.R. Alam, K.S. Lee, M. Rahman, and Y.F. Zhang, "Automated process planning for the manufacture of sliders", Computers In Industry, Vol. 43, pp. 249-262, 2000.

[11] M.R. Alam, "Computer-Aided Process Planning for the Manufacture of Injection Molds", PhD dissertation, National University of Singapore, 2003.

[12] F. Zhang, Y.F. Zhang, and A.Y.C. Nee, "Using genetic algorithms in process planning for job shop machining", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 1, No. 4, pp. 278-289, 1997.

[13] H. Szu, "Fast simulated annealing", Proceedings of the American Institute of Physics Conference on Neural Computing, 1986, pp. 420-425.

[14] Y.F. Zhang, A.N. Saravanan, and J.Y.H. Fuh, "Integration of process planning and scheduling by exploring the flexibility of process planning", International J of Production Research, Vol. 41, No. 3, pp. 611-628, 2003.

第 8 章　注射模具的早期成本概算

8.1　概述

成本的早期概算在制品开发周期中起重要的作用。虽然模具成本占总模塑制品成本的比例并不大，但是模具设计阶段，会牵涉到制品成本 70% ~80%，这已经被大量报导了[1-3]。如果在模具设计初期做些必需的修正，就可以节省制品成本，提高制品的质量和生产率。为了达到这个目的，必须在早期就对制品成本做出精确的概算。按传统的理解，制品成本是许多成本的总和，包括材料成本、加工装备成本、直接劳动力成本、管理经营费用和工程成本等。然而，需求的信息不仅包括制品设计的细节，还需要工艺规程的信息，还包括在设计阶段不能获知的直接成本因素。在必要阶段，基于设计信息的制品成本概算方法，能帮助设计者做出良好的综合决策。

对模具制造者来说，注射模的早期成本估计尤为重要。这要从两方面来讨论。首先，模具制造公司接洽持有制品设计图的客户时，行情工程师要在短时间内根据给出的制品的加工需求，作出些必须的初步设计，如型腔数目等，从而估算出模具成本。对于公司来说，关键是评估的准确性。如果评估价格比实际成本低很多，那么公司接单生产将会面临损失。另一方面，如果估价高于实际成本，公司将会失去生产定单。第二，给定制品的成型模具设计完成后，在试图修改各不同的模具设计时也需要工程师估价成本。目前，工程师主要通过经验来进行估价，这样很可能导致估价的不准确和不一致。由于成本估算传统上是制造工程师的职能，在模具设计中设计工程师有制造成本知识方面的局限。很明显，对于模具行情工程师和设计工程师来说，都需要有又快又好的早期成本概算的系统工具。

一致的工程概念早在 1980 年就得到了介绍，所以已经有了许多关于成本估价方面的文献，其中就有一些专门关注设计早期阶段成本概算的文章。它们的估算方法能分为如下的基本类型。

1）简化故障的方法——成本概算是基于最佳制造方法的假设，不考虑工艺和装备的实际运行。对于故障因素常需要开发经验计算式。这个处理方法的典型范例有：Dewhurst 和 Boothroyd[4] 关于机械加工和注射模塑组元的成本估算的模式；Boothroyd 和 Raynolds[5] 关于回转体工件的成本估算模式；Boothroyd 和 Rado-

vanovic[6]关于机械加工组元的成本估算模式。这种方法的缺点是很难根据实际的成本信息修正成本概算。

2）技术组(GT)-基本处理法——成本概算基于相似性原理，使用基本成本价的范例，再计入各种成本因子，如尺寸和复杂性造成的成本变数的影响等。最终成本和变化的成本因素之间假设呈线性的关系。由 Poli 等人[7]开发的注射模的成本概算工具是该法的成功范例。它采用六位要素的的设计代码，通过查看目录的代码来取得成本因子。

3）成本函数的增加处理法——这种方法用于一组特定的模塑制品。制品的成本可以描述为制品基本设计的成本。指数和系数可以通过回顾分析历来成本数据来获得。Wierda[8]和 Hunda[9]给出这种方法的完整陈述。应用成本函数解决问题依赖对它们的推理。成本函数是具有许多变量的函数，其表述十分复杂和困难。而且，对每一组工件都必须有新的函数。

4）基于活动性的成本 ABC 法——ABC 法是工件成本累加的方法，它取决于所有成本因子结合活动性的需求成本。基于历史观察或估计的数据能计算出表现活动性的单位成本。对于新工件的成本概算依赖于该工件的这些活动因子的费用。Ong[10]完成的成本概算平台，是此种类型的范例，它支持导线系统装配式的设计，假定电子元件连接装配。

5）近似神经网络的成本函数法——它应用了近似引导方法，参照模塑制品与模具成本的历史数据，处理成本与成本有关的因子（设计和制造）之间的近似关系。用神经网络指导工艺的执行。它假设制品设计以制造工艺的成本为根据，以加工实际的组成为成本的组分。Zhang 等人[11,12]开发了捆绑制品的成本估算模式，该处理方法是近似系统网络的成本函数法的典型范例。

注射模零部件设计的成本评估，要比加工工件困难得多。这是由于注射模设计本身就是一项艰巨的任务。而且影响模具成本的因素是多维的，成本和这些因素之间关系也是复杂的和非线性的。因而，如果不能开发一个基于数学及科学原理的精确分析模式，其成本估算将会是十分困难的。另一方面，人们非常希望有个相当精确的计算机模式来快速地完成成本概算。考虑这些需求，成本函数的近似处理方法必将被选择用来作为开发注射模成本概算工具。

在本章中，将首先介绍成本函数用于神经网络的处理方法。然后介绍按模具零部件设计和它们的质量关系识别成本因子的方法。讲述历史资料和成本数据的使用，教大家学会对近似的成本函数使用神经网络的过程。

8.2 神经网络的近似成本函数法

成本函数近似处理方法中主要有两个阶段。首先是数据准备价段，定义成本

函数的变量并收集历史数据。第二阶段，包含有神经网络的近似函数使用。第一阶段的重要步骤描述如下。

1）需要定义制品/工件的领域。常定义整段时间的某公司生产的制品/工件组，应选择在材料成本和制造技术/业务关系稳定一致的时间段。

2）在设计工作中需要所有成本关系因子 CF_s（cost-related factors）都被确立。定义领域内所有制品/工件都应确定成本关系因子 CF_s。

3）每个 CF_s 的数量都要建立有量化方案。有两种类型的 CF_s。第一种是连续的数量值，它能被简单地规准量化。第二种是设计变量，一般没有任何数值被分配到每个需量化的变量。通常，依照成本因子 CF 的各个成本花费的不同状态来指定的数值并不成比例关系，要求量化方案对每个成本因子 CF 的所有状态都要考虑。

4）收集历史成本数据。个案进程和范例的选择能有效地用于近似函数。因此，前期生产制品/工件的工艺资料可全部编入范例中。对于每个选择的范例，它的成本因子 CF_s 被摘取和量化。活动性成本用于故障处理，最终建立起一系列活动成本的 $\{CF_s\}$ 函数。

在这一阶段的结束收集了一套完整的范例。每个范例点都需要设置许多成本因子（CF_1，CF_2，…，CF_n）输入给成本。设定 n 为 CF_s 总个数。

建立数字化范例后，有不同方法在（CF_1，CF_2，…，CF_n）和成本之间设立近似函数。这种回归方法是对近似函数的传统处理方法。通过历史数据回归分析，获得系数和指数。然而，成本和 CF_s 之间的非线性关系是未知的，必须做适当的假设。

人工神经网络 NN（neural networks）是使用计算机的模仿生物神经系统的信息化技术[13]。NN 的重要特点之一是可用于不明确输入与输出关系的系统模式中。通常，系统没有精确的信息，仅能研究已有实际系统的有用范例，并使网络认识它。给出固定的人工网络，用随机梯度方法使之执行网络参量的修改，最终使损耗函数最小。在各种人工神经网络 NN 中，逆向传送网络BP-NN（back propagation NN）常从一些范例认识输入、输出关系，适用于近似函数。

在 BP-NN 网络中，有输入层和输出层，在它们之间有一个到几个的隐藏层。每层都有许多过程单元，称为神经元。图 8-1 所示为三层 BP-NN 系统，只有单一输出。神经元计算了加权的输入和，再从总和中减去它的临界值，并经转换函数传递结果。这可以用下面的表达式来表示。

$$y_i = f_i\left(\sum_{j=1}^{n} w_{ij}x_j - s_i\right) \tag{8-1}$$

式中 x_j——当前的输入；

y_i——神经元的输出；

w_{ij}——与 x_j 相关联的加权数；

s_i——神经元的临界值；

f_i——转换函数[14]。

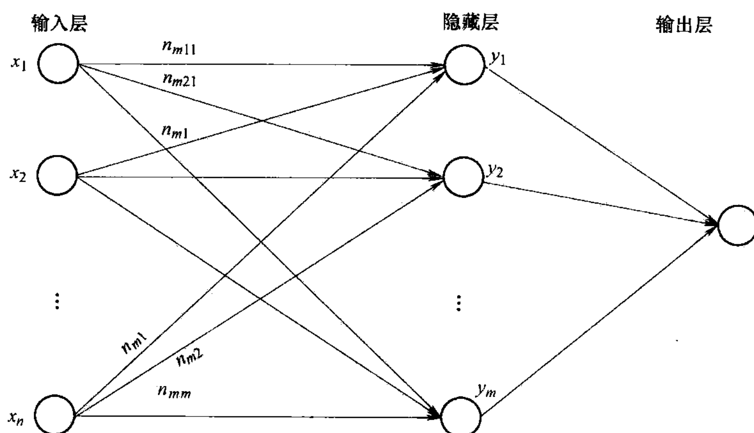


图 8-1 三层的神经网络系统

w_{ij}的值决定了输入对神经元影响的强弱。在试算过程中，权重的数量值可改变。它主要通过神经元适应新信息的机理来完成认识过程。BP-NN 参照了它们的试用算法（training algorithm），被称为误差逆向传送。这个网络在开始试用时指定所有权重的随机值。随后将其输入当前网络，并从每层上的每个神经元经过整个网络向前传送，影响实际的输出。将实际输出和它对应的目标输出相比较并估算出差异，作为输出层中每个神经元的错误。这个错误经过整个网络返回传送，在专门的神经元中按差错的直接比例调整连接单元的权重。通过这种网络方法来减少错误。由于对每个输入范例的输出目标是已知的，这个试算过程也称为控制试算（supervised training）。

在神经网络的认识阶段，应设置错误的范围作为停止试算的临界值。一旦试算完成，NN 网络设定了最终的权重和偏差就代表了近似的成本函数。给出新的制品/工件后，先进行 CF_s 的提取和定量，然后将其输入给 NN，计算出概算成本。

8.3 注射模具中与成本相关的因素

与成本相关的因子 CF_s 影响着模具的成本。这些因素包括模具零部件的技术条件，它与模具设计时想得到的技术要求一致。前者从客户的要求而来，后者则基于设计者的设计功底。举例来说，零部件规格包括零件的尺寸、质量、公差、基座类型和数量，以及肋和突台等。同样也包括相关零件的结构、表面雕刻花纹及表面光洁程度等。概念化模具设计的技术要求包括型腔的数目、分型面的形状、内部和外部切削加工量等，也对应着一些滑块体和滑杆的需要。

成本相关因子 CF_s 的确定，主要参照模具报价、有经验的设计和制造工程师的意见。结果有 19 个 CF_s 已经被定义。这些因子被量化，将它们的作用状态用 0 到 1 之间的数值分配到每个 CF。个别专门模具制造厂家的规整化因子 CF_s，没有什么价值。Lim[15] 和 Sharifuddin[16] 提出的 CF_s 和它们的定量设计陈述如下。

1）型腔的数目(N)。它决定于概念化的模具设计阶段。型腔的数目越多，模具的价格就越高。$CF_1 = N/16$（在公司制造模具型腔的最大数目是 16）。

2）模塑制品质量（W/g）。$CF_2 = W/2000$（假设公司的制品最大质量为 2000g）。

3）制品在分型面上的投影面积(A/cm^2)。投影面积的增大会增加型芯和型腔板及模架的成本。$CF_3 = A/30000$（假设公司制品的最大投影面积为 30000cm^2）。

4）开模方向的模具高度(H/cm)。模具高度增大会增加型芯和型腔模板的成本。$CF_4 = H/30$（假设公司的模具最大高度为 30cm）。

5）模具的类型。下面列举了模具的四种类型和与它们相应的 CF_5。

①冷流道两板模，$CF_5 = 0.1$。

②冷流道三板模，$CF_5 = 0.13$。

③单喷嘴热流道模具，$CF_5 = 0.2$。

④多喷嘴（2～6）热流道模具，$CF_5 = 0.5$。

6）分型面的类型。分型面分离型腔和型芯。越复杂的分型面，加工的成本就越高。下面给出了分型面的六种类型和与它们相对应的 CF_6。

①平面分型，$CF_6 = 0$。

②单个阶梯平面，$CF_6 = 0.3$。

③单个的阶梯平面或简单曲面，$CF_6 = 0.5$。

④多于四个的阶梯平面，$CF_6 = 0.63$。

⑤复杂的曲面，$CF_6 = 0.75$。

⑥有阶梯的复杂的曲面，$CF_6=1$。

7）型腔上滑块机构的数量(NS_{cav})。滑块机构垂直开模方向，从注射制品外则凹槽中抽出。滑块机构组装到型腔需要液压力来抽拔，因此增加了成本。$CF_7=NS_{cav}/2$（假设在模具型腔上滑块机构的数量最多为2)。

8）型芯上滑块机构的数量(NS_{cor})。比起在型腔中的滑块机构，此种滑块机构的成本较低。由斜导柱和弹簧作用来抽拔成型零件。然而，增加滑块机构的数量一定会增加模具的成本。$CF_{10}=NS_{cor}/12$（在模具中滑块机构最大的数量为12)。

9）内侧抽拔机构的数量(NL_{lar})。内侧抽拔机构沿着开模方向在模塑件的侧凹槽上抽拔。模具中增加内侧抽拔机构的数量，会增加模具的成本。$CF_9=NL_{car}/4$（模具中内侧抽拔机构的最多数目为4)。

10）小内侧抽拔机构的数量(NL_{sma})。$CF_{10}=NL_{sma}/8$（模具中的小内侧抽拔机构的最多数目为8)。

11）表面粗糙度。降低对表面粗糙度值的要求无疑会增加成本。下面列举的表面粗糙度要求和与之对应的CF_{11}值。

①无要求，$CF_{11}=0.1$。

②标准无光泽（SPE#3)，$CF_{11}=0.15$。

③不反光低粗糙度，$CF_{11}=0.2$。

④反光低粗糙度（SPE#2)，$CF_{11}=0.3$。

⑤最低粗糙度（SPE#1)，$CF_{11}=4$。

12）雕刻。模具有三种常见的雕刻类型：普通刻字、隆起文字或商标、模内标签和图形。CF_{12}定量如下所述：

①没有雕刻，$CF_{12}=0.1$。

②普通刻字，$CF_{12}=0.2$。

③隆起文字或商标，$CF_{12}=0.5$。

④模内标签和图形，$CF_{12}=0.7$。

13）型芯的结构。若在型芯一侧，$CF_{13}=0.2$；另外方式，$CF_{13}=0.1$。

14）型腔的结构。若在型腔一侧，$CF_{14}=0.2$；另外方式，$CF_{14}=0.1$。

15）制品上尺寸公差。制品尺寸公差的要求对模具制造过程和加工成本有很大的影响。这是因为模具制造者按很小公差制造模具，它只是经模塑过程遗留下来的公差带。下面给出的是CF_{15}定量。

①大于±0.5mm，$CF_{15}=0.01$。

②近似±0.35mm，$CF_{15}=0.07$。

③近似±0.25mm，$CF_{15}=0.17$。

④近似±0.20mm，$CF_{15}=0.33$。

⑤近似 ±0.1mm，$CF_{15}=0.67$。

⑥近似 ±0.05mm，$CF_{15}=0.8$。

⑦近似 ±0.03mm，$CF_{15}=1.0$。

16）制品上的肋。肋的存在会增加模具的制造成本。以塑料制品上肋的大致数量和类型，CF_{16}的定量如下所述。

①没有肋，$CF_{16}=0.1$。

②浅的（深度 <10mm）和少的（<5），$CF_{16}=0.12$。

③浅的（深度 <10mm）和多的（>5），$CF_{16}=0.15$。

④深的（深度 >10mm）和少的（<5），$CF_{16}=0.17$。

⑤深的（深度 >10mm）和多的（>5），$CF_{16}=0.4$。

17）制品上的装饰。存在装饰会增加模具的制造成本。按装饰的大致数量和类型，CF_{17}的定量如下所述（本条内的数值原书可能有误，译者注）。

①没有装饰，$CF_{17}=0.1$。

②浅的（深度 <10mm）和少的（<5），$CF_{17}=0.12$。

③浅的（深度 <10mm）和多的（>5），$CF_{17}=0.15$。

④深的（深度 >10mm）和少的（<5），$CF_{17}=0.17$。

⑤深的（深度 >10mm）和多的（>5），$CF_{17}=0.4$。

18）脱模顶出机构类型。共有四种不同推顶类型的脱模顶出机构，会导致不同的成本。CF_{18}定量如下。

①顶杆脱模，$CF_{18}=0.1$。

②片条顶出，$CF_{18}=0.2$。

③杆块顶出，$CF_{18}=0.35$。

④双脱模，$CF_{18}=0.5$。

19）液压缸的数目(N_{hyd})。液压缸的使用会额外增加模具成本，CF_{19}定量给出：$CF_{19}=N_{hyd}/4$（模具中液压缸数量最多为4）。

以上 CF 的类型主要在电子消费产品的模具制造中得到了认同。以公司先前的模具生产作为量化标准因子基础。对其他类型模具的成本概算，这些因素应该被重新验证，标准化的因子要重新定义。

基于上面 CF 的定义，对 92 副生产模具的零件进行检验，并提取了它们的 CF_s，依照制造数据计算了它们对应模具的实际成本。这些成本值乘以常数因子，保证了真实性。92 套 CF_s 的设置与成本数据的汇集，列于表 8-1 中。

虽然收集的制品样本仅是公司生产模具的一部分，但认为已充分代表了整个范围里模具的大多数。举例说，模塑制品样本的质量从 2g 到 2000g，投影面积从 $5cm^2$ 到 $14360cm^2$，成本从 20K 到 500K。制品范例的成本分布如图 8-2 所示。

表 8-1 历史数据（制品范例 1 ~ 92）

序号	CF_1	CF_2	CF_3	CF_4	CF_5	CF_6	CF_7	CF_8	CF_9	CF_{10}	CF_{11}	CF_{12}	CF_{13}	CF_{14}	CF_{15}	CF_{16}	CF_{17}	CF_{18}	CF_{19}	成本/美元
1	0.13	0.055	0.0485	0.83	0.20	1.00	0	0.33	0	0.5	0.15	0.20	0.20	0.20	0.67	0.15	0.12	0.10	0.50	169 000
2	0.25	0.005	0.0036	0.18	0.10	0.30	0	0.18	0	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.10	0.10	0.10	0	23 400
3	0.13	0.05	0.0453	0.4	0.20	1.00	0	0.5	0	0.88	0.40	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.10	0	143 000
4	0.06	0.275	0.086	0.6	0.20	0.50	0	0	0	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.10	0.10	0	163 800
5	0.13	0.005	0.0009	0.03	0.10	0.30	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	17 000
6	0.13	0.1	0.0072	0.16	0.10	0.10	0	0.33	0	0	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.10	0	37 100
7	0.13	0.1	0.0132	0.27	0.20	0.30	0	0.5	0	0	0.15	0.20	0.20	0.10	0.67	0.17	0.12	0.10	0	81 900
8	0.13	0.2	0.0072	0.16	0.10	0.10	0	0	0	0	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.35	0	23 400
9	0.06	0.005	0.008	0.23	0.20	0.63	0	0.17	0	0	0.15	0.20	0.20	0.20	0.67	0.12	0.12	0.10	0	25 200
10	0.13	0.01	0.0101	0.22	0.10	0.30	0	0	0	1	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.10	0	25 400
11	0.06	0.1	0.0117	0.18	0.20	0.10	0	0	0.25	0.38	0.15	0.10	0.10	0.20	0.67	0.15	0.10	0.10	0.25	115 600
12	0.130	0.05	0.0117	0.28	0.20	0.30	0	0.17	1	0	0.15	0.20	0.20	0.20	0.67	0.12	0.12	0.35	0	156 000
13	0.06	0.3375	0.0053	0.33	0.20	0.50	0	0.17	0.25	0.25	0.15	0.10	0.10	0.20	0.67	0.15	0.17	0.10	0.25	202 800
14	0.13	0.08	0.012	0.35	0.20	0.50	0	0.17	1	0	0.15	0.20	0.20	0.20	0.57	0.15	0.12	0.10	0	169 000
15	0.13	0.235	0.017	0.42	0.50	0.63	0	0.67	0	0	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.40	0.40	0.10	0	478 400
16	0.06	0.3625	0.0487	0.53	0.20	0.50	0	0.17	0	0	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.40	0.10	0	247 000
17	0.06	0.375	0.035	0.67	0.50	0.50	0	0.17	1	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.15	0.10	0.10	0.50	257 400
18	0.13	0.0015	0.0009	0.03	0.10	0.30	0	0	0	0.5	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.15	0.12	0.10	0	37 100
19	0.25	0.001	0.0002	0.03	0.01	0.01	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.57	0.12	0.12	0.10	0	15 600
20	0.13	0.0025	0.0007	0.04	0.10	0.30	0	0	0	0	0.20	0.20	0.10	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	12 600
21	0.06	0.0005	0.001	0.02	0.10	1.00	0	0.08	0	0	0.20	0.10	0.10	0.10	0.80	0.15	0.10	0.10	0	48 100

（续）

序号	CF_1	CF_2	CF_3	CF_4	CF_5	CF_6	CF_7	CF_8	CF_9	CF_{10}	CF_{11}	CF_{12}	CF_{13}	CF_{14}	CF_{15}	CF_{16}	CF_{17}	CF_{18}	CF_{19}	成本/美元
22	0.13	0.0015	0.0017	0.03	0.50	1.00	0	1	0	0	0.20	0.20	0.10	0.10	0.80	0.15	0.10	0.10	0	39 300
23	0.13	0.03	0.0028	0.17	0.50	0.63	0	0.33	0	0	0.15	0.20	0.20	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	114 400
24	0.25	0.03	0.0077	0.01	0.50	0.63	0	0.67	0	0	0.20	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.10	0	101 400
25	0.13	0.015	0.0043	0.02	0.10	0.63	0	0.5	0	0	0.20	0.20	0.10	0.10	0.67	0.15	0.10	0.10	0	78 000
26	0.063	0.35	0.499	0.57	0.50	0.50	0	0.083	0	0.25	0.20	0.10	0.10	0.20	0.67	0.12	0.12	0.10	0.50	247 000
27	0.125	0.005	0.004	0.027	0.10	0.30	0	0.333	0	0.25	0.20	0.50	0.10	0.20	0.67	0.12	0.10	0.10	0	83 000
28	0.063	0.003	0.0009	0.023	0.20	1.00	0	0.167	0	0.625	0.20	0.20	0.10	0.20	0.80	0.10	0.10	0.10	0	98 300
29	0.125	0.006	0.003	0.077	0.10	0.10	0	0.083	0	0	0.20	0.20	0.10	0.10	0.67	0.15	0.10	0.10	0	52 000
30	0.25	0.002	0.0003	0.017	0.10	0.10	0	0	0	0	0.20	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	16 700
31	0.125	0.005	0.002	0.07	0.10	0.50	0	0	0	0	0.20	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.10	0.10	0	69 900
32	0.125	0.005	0.004	0.067	0.10	0.30	0	0	0	0.375	0.20	0.10	0.10	0.20	0.67	0.15	0.10	0.10	0	39 000
33	0.063	0.3	0.053	0.077	0.50	0.50	0	0	0	0	0.20	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.10	0.35	0	179 400
34	0.125	0.045	0.009	0.12	0.50	0.50	0	0	0	0	0.10	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.12	0.10	0	91 000
35	0.063	0.375	0.007	0.083	0.20	0.63	0	0	1	0	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.40	0.10	0.10	0	171 674
36	0.063	0.4	0.037	0.567	0.50	1.00	0	0.167	0	0.25	0.15	0.20	0.10	0.10	0.80	0.15	0.15	0.10	0.25	247 000
37	0.063	0.1	0.035	0.533	0.20	0.10	0	0.083	0.25	0	0.20	0.10	0.30	0.10	0.67	0.17	0.10	0.35	0	63 700
38	0.125	0.004	5E-05	0.05	0.10	0.10	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	23 000
39	0.125	0.01	0.006	0.2	0.50	0.30	0	0.333	0	0	0.15	0.10	0.30	0.20	0.67	0.15	0.10	0.10	0	41 600
40	0.063	0.1	0.013	0.063	0.20	0.10	0	0.083	0	0	0.15	0.50	0.10	0.20	0.80	0.17	0.10	0.10	0	93 600
41	0.125	0.01	0.003	0.033	0.50	1.00	1	0.333	0	0	0.15	0.10	0.10	0.20	1.00	0.12	0.10	0.10	0	115 000
42	0.25	0.0025	0.0004	0.04	0.50	0.10	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	1.00	0.12	0.12	0.10	0	110 000
43	0.125	0.08	0.019	0.15	0.20	1.00	0	0	0.75	0	0.15	0.10	0.10	0.20	0.80	0.12	0.12	0.10	0	42 000
44	0.125	0.08	0.019	0.15	0.20	1.00	0	0	0.75	0	0.15	0.10	0.10	0.20	0.80	0.12	0.12	0.10	0	38 000

（续）

序号	CF_1	CF_2	CF_3	CF_4	CF_5	CF_6	CF_7	CF_8	CF_9	CF_{10}	CF_{11}	CF_{12}	CF_{13}	CF_{14}	CF_{15}	CF_{16}	CF_{17}	CF_{18}	CF_{19}	成本/美元
45	0. 125	0. 001	2E-04	0. 133	0. 10	0. 10	0	0	0. 00	0	0. 15	0. 10	0. 10	0. 20	0. 80	0. 10	0. 12	0. 10	0	32 000
46	0. 125	0. 0015	2E-04	0. 053	0. 10	0. 10	0	0. 00	0	0. 15	0. 10	0. 10	0. 20	0. 80	0. 10	0. 10	0. 10	0. 10	0	30 000
47	0. 125	0. 075	0. 013	0. 0767	0. 20	0. 75	0	0. 333	1. 00	0	0. 15	0. 20	0. 10	0. 20	0. 80	0. 12	0. 12	0. 10	0. 25	158 000
48	0. 125	0. 075	0. 013	0. 08	0. 20	0. 75	0	0. 333	1. 00	0	0. 15	0. 20	0. 10	0. 20	1. 00	1. 00	0. 12	0. 10	0	156 800
49	0. 125	0. 075	0. 013	0. 0767	0. 20	0. 75	0	0. 333	1. 00	0. 125	0. 15	0. 20	0. 10	0. 20	0. 50	0. 12	0. 12	0. 10	0	15 800
50	0. 0625	0. 28	0. 025	0. 4167	0. 20	0. 10	0	0. 167	0. 50	0. 02	0. 15	0. 20	0. 10	0. 20	1. 00	0. 17	0. 10	0. 10	0. 50	310 800
51	0. 125	0. 013	0. 0012	0. 05	0. 10	0. 30	0	0	0	0	0. 15	0. 20	0. 10	0. 10	0. 80	0. 12	0. 12	0. 10	0	52 000
52	0. 125	0. 0001	0. 0003	0. 007	0. 10	0. 10	0	0	0	0	0. 20	0. 10	0. 20	0. 20	1. 00	0. 10	0. 10	0. 10	0	113 000
53	0. 25	0. 005	0. 0004	0. 043	0. 10	0. 10	0	0	0	0	0. 20	0. 10	0. 20	0. 20	1. 00	0. 10	0. 10	0. 10	0	23 000
54	0. 125	0. 008	0. 0022	0. 04	0. 10	0. 10	0	0. 3	0	0	0. 20	0. 10	0. 20	0. 20	1. 00	0. 12	0. 10	0. 10	0	38 000
55	0. 25	0. 004	0. 0004	0. 083	0. 10	0. 50	0	0	0	0	0. 15	0. 10	0. 10	0. 10	1. 00	0. 10	0. 10	0. 10	0	16 500
56	0. 125	0. 002	0. 0001	0. 08	0. 10	0. 30	0	0. 2	0	0	0. 15	0. 10	0. 10	0. 20	0. 80	0. 10	0. 10	0. 10	0	30 000
57	0. 25	0. 04	0. 0025	0. 1	0. 20	0. 50	0	0. 3	0	0. 5	0. 15	0. 10	0. 10	0. 20	0. 50	0. 10	0. 10	0. 10	0	45 000
58	0. 063	0. 325	0. 045	0. 15	0. 20	0. 10	0	0	0	0	0. 15	0. 20	0. 10	0. 20	0. 80	0. 10	0. 10	0. 35	0	179 800
59	0. 25	0. 01	0. 0010	0. 107	0. 10	0. 10	0	0. 1	0	0. 13	0. 15	0. 20	0. 10	0. 20	0. 80	0. 10	0. 12	0. 10	0	17 000
60	0. 125	0. 15	0. 015	0. 367	0. 20	0. 10	0	0. 1	0. 25	0. 25	0. 15	0. 20	0. 10	0. 20	1. 00	0. 00	0. 10	0. 10	0. 25	156 000
61	0. 063	1	0. 0833	0. 533	0. 20	1. 00	0	0. 3	1	0	0. 15	0. 20	0. 20	0. 20	0. 67	0. 40	0. 15	0. 10	0. 50	429 100
62	0. 125	0. 3	0. 0074	0. 083	0. 20	0. 50	0	0. 3	0	1	0. 15	0. 20	0. 10	0. 20	0. 67	0. 17	0. 10	0. 35	0	70 000
63	0. 125	0. 05	0. 0014	0. 067	0. 10	0. 50	0	0	0	0	0. 15	0. 10	0. 10	0. 10	0. 67	0. 17	0. 10	0. 10	0	50 000
64	0. 063	0. 5	0. 0181	0. 3	0. 2	1. 00	0	0. 2	0	0	0. 15	0. 20	0. 10	0. 10	0. 67	0. 40	0. 10	0. 10	0	60 000
65	0. 063	0. 7	0. 0533	0. 15	0. 20	0. 63	0	0	0	0	0. 15	0. 10	0. 10	0. 10	0. 67	0. 40	0. 10	0. 10	0	214 600
66	0. 063	0. 8	0. 0493	0. 35	0. 20	1. 00	0	0. 2	0	0	0. 15	0. 20	0. 20	0. 20	0. 67	0. 40	0. 10	0. 10	0	321 800
67	0. 063	0. 5	0. 0216	0. 1	0. 20	1. 00	0	0. 2	0	0	0. 15	0. 10	0. 10	0. 10	0. 67	0. 40	0. 12	0. 10	0	107 300
68	0. 063	1	0. 15	0. 367	0. 10	1. 00	0	0. 1	0	0	0. 15	0. 20	0. 20	0. 10	0. 67	0. 40	0. 12	0. 10	0	536 500

（续）

序号	CF_1	CF_2	CF_3	CF_4	CF_5	CF_6	CF_7	CF_8	CF_9	CF_{10}	CF_{11}	CF_{12}	CF_{13}	CF_{14}	CF_{15}	CF_{16}	CF_{17}	CF_{18}	CF_{19}	成本/美元
69	0.125	0.3	0.0074	0.083	0.20	0.50	0	0.3	0	1	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.17	0.12	0.10	0	60 000
70	0.063	0.75	0.0447	0.167	0.20	0.63	0	0.1	0	1	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.17	0.12	0.10	0	180 000
71	0.063	0.5	0.04	0.1	0.20	0.63	0	0.1	0	0.75	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.40	0.10	0.10	0.25	193 100
72	0.063	0.65	0.0517	0.1	0.20	0.63	0	0.2	0	0.63	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.40	0.12	0.10	0.50	214 600
73	0.125	0.01	0.0021	0.093	0.10	0.50	0	0	0	1	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.17	0.12	0.10	0	60 000
74	0.125	0.3	0.0074	0.083	0.20	0.50	0	0.3	0	1	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.17	0.12	0.10	0	70 000
75	0.125	0.01	0.0021	0.05	0.10	0.50	0	0	0	1	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	65 000
76	0.063	0.8	0.0417	0.4	0.10	1.00	0	0.1	0	0	0.15	0.10	0.10	0.20	0.67	0.40	0.40	0.10	0	321 900
77	0.125	0.3	0.0074	0.25	0.20	0.50	0	0.3	0	1	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.17	0.17	0.10	0	60 500
78	0.125	0.005	0.0076	0.027	0.10	0.10	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.10	0	35 000
79	0.063	0.008	0.0022	0.26	0.10	0.63	0	0.2	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.50	0	40 000
80	0.125	0.004	0.0012	0.033	0.10	0.30	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.10	0	30 000
81	0.125	0.002	0.0001	0.013	0.10	0.10	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	30 000
82	0.063	0.01	0.02	0.15	0.13	0.63	0	0.1	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.40	0.12	0.10	0	70 000
83	0.063	0.4	0.0583	0.2	0.20	0.63	0	0.3	0	0.50	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.12	0.10	0.25	214 600
84	0.063	0.5	0.0583	0.247	0.20	0.63	0	0.3	0	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.12	0.10	0.25	180 000
85	0.063	0.005	0.0008	0.027	0.13	0.63	0	0.3	0	0.13	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	40 000
86	0.125	0.065	0.0022	0.117	0.20	0.63	0	0.2	0	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.12	0.10	0	90 000
87	0.125	0.003	0.0014	0.027	0.10	0.30	1	0.3	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.12	0.12	0.10	0	30 000
88	0.125	0.003	0.0013	0.027	0.10	0.30	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.12	0.12	0.10	0	30 000
89	0.125	0.035	0.0040	0.15	0.10	0.63	0	0	0	0.25	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	60 000
90	0.063	0.025	0.0043	0.04	0.10	0.63	0	0	0	0.25	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	55 000
91	0.25	0.004	0.0001	0.063	0.10	0.10	0	0	0	0	0.30	0.10	0.10	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	25 000
92	0.063	0.015	0.0029	0.193	0.10	0.63	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.15	0.10	0.10	0.10	0	60 000

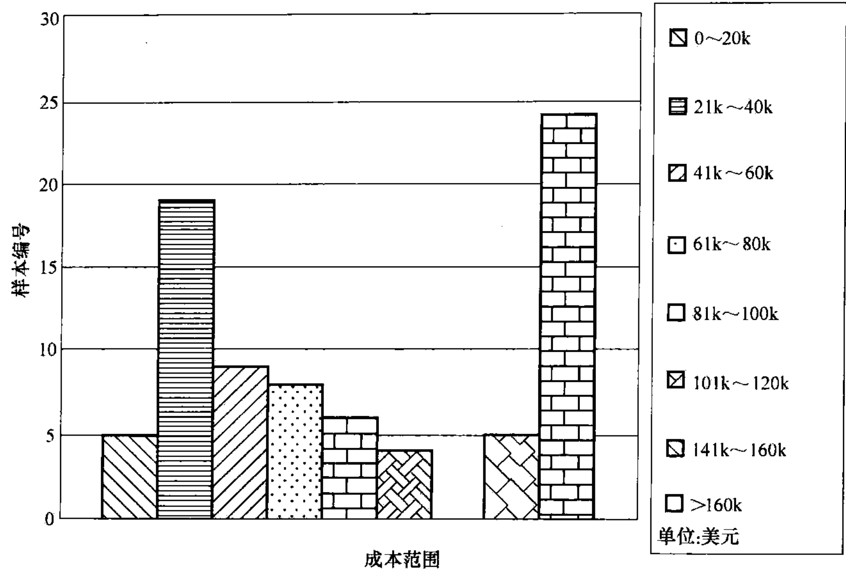


图 8-2 制品范例成本分布

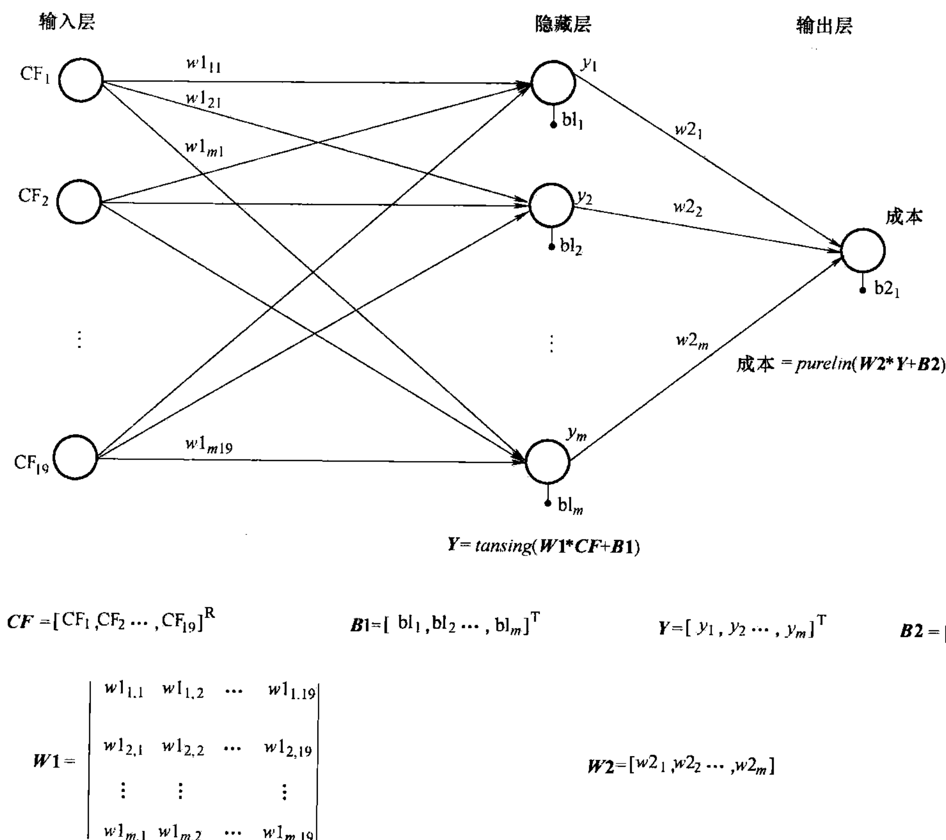
8.4 神经网络训练

神经网络的操作有三个阶段。要从一些输入到输出范例中搞清输入与输出关系。第一步选择神经网络结构，包括层的数目、每层的神经元数目和每层所用的转换功能。第二步用所选择的神经网络操作所使用范例，直到在实际输出和目标输出之间的误差趋于收敛。如果误差在已定目标误差之内，可认为操作完成。第三步，用一些测试范例来测验操作的神经网络。测试的范例不是操作实例。如果概算的误差在测试范例的目标误差内，操作和测验认为是成功的，神经网络被顺利使用。整个过程通常是操作—误差的反复迭代过程。

8.4.1 神经网络的构建

从目前的应用来看，反馈传输神经网络应用 MATLAB 神经网络工具来完成程序编写[14]。在输入层，一些神经元与成本相关因子是相同的，也就是本例中的 19 项。在输出层，仅有一个神经元表述成本。神经网络有一个或者很多个隐藏层。基于经验，近似的非线性关系有个隐藏层就足够了。所以，这里应用了一个隐藏层。隐藏层的转变函数是 tan-sigmoid，而线性函数 purelin 用在输出层。此神经网络的结构说明如图 8-3 所示。注意到在隐藏层中神经元的数目需要确定。***CF*** 是输入矢量。***W*1** 是输入层和隐藏层之间内部连接的权重矩阵。***W*2** 是隐藏层

和输出层之间内部连接的权重矩阵。**B**1 和 **B**2 分别是在隐藏层和输出层里的神经元的偏置矢量。



$CF=[CF_1, CF_2\cdots, CF_{19}]^R$ $B1=[bl_1, bl_2\cdots, bl_m]^T$ $Y=[y_1, y_2\cdots, y_m]^T$ $B2=[b2_1]$

$$W1=\begin{vmatrix} w1_{1,1} & w1_{1,2} & \cdots & w1_{1,19} \\ w1_{2,1} & w1_{2,2} & \cdots & w1_{2,19} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w1_{m,1} & w1_{m,2} & \cdots & w1_{m,19} \end{vmatrix}$$

$$W2=[w2_1, w2_2\cdots, w2_m]$$

图 8-3 成本概算的 BP 神经网络

8.4.2 训练过程

以上陈述的神经网络，已经用反传输操作规则（back propagate training rule）进行了测试[14]。隐藏层中的神经元数量需要确定，所以在各次的操作—误差循环期间，开始动用 20 个神经元，每次操作有 10 至 100 个神经元的增量。每个专门神经网络中，其随机功能以 -1 到 +1 之间赋值。然后将权重和偏差逐次调整到最小的网络误差平方和，并朝着误差急剧下降方向不断改变权重和偏差。

通常，操作在满足以下条件之一即可停止：①误差的平方和比用户目标偏差小；②达到数量最大信号。然而在目标偏差未知时，可观察误差的平方和收敛于某个值的趋势，并以此作为操作次数增加的信号。所以，设置的目标偏差实际上

不能达到。另一方面，在任何瞬时都计算误差的平方和的相对变化率 *RCR* (relative changing rate)。每当500次操作完成时，给出如下计算。

$$RCR_i = \frac{SSE_{(i+1)\times 500}}{SSE_{i\times 500}} \quad (i=1,2,3,\cdots) \tag{8-2}$$

式中 $SSE_{(i+1)\times 500}$——在$(i+1)\times 500$次的误差平方和；

$SSE_{i\times 500}$——在$i\times 500$的误差平方和。

而且设置的最大测试次数是很大的数值，这样才能保证操作中误差的平方和仅收敛于一定值。在测试500次后的每个校核点，如果$0.99 < RCR < 1.01$，则操作停止。

为了能更快地操作网络，用两种措施提高测试效率。动量和适应速率 (momentum and adaptive learning rate)已经被连接到操作程序中[14]。动量可以减少反传输中，对表层细微枝节的敏感性，帮助网络避免因微小差错而阻塞。另一方面，高的适应速率能保证网络畅通。然而，如果适应速率太大，研究问题时就会跳过微小的错误而不能收敛。适应速率的使用，能做到使运行步距大到足以保持运作速率。

当完成了神经网络的操作后，误差平方和按照相对变化率 *RCR* 收敛。我们看到，大多数操作实例概算误差都达到很小的值，相对误差小于5%。然而，这并不意味着神经网络操作得很好，还有数据失常 (over-fitting)。过程的验证必须应用神经网络校核其是否具有概括能力。应用神经网络的实例来引导验证过程并不包含在操作过程里。将这些实例的概算成本与它们实际成本作比较，如果这些实例的相对概算误差与操作实例是可比较的，则神经网络被认为具有概括能力的。否则，这个网络失常，不能使用。

8.4.3 训练和验证结果

在目前的应用中，如表8-1中的92个范例，都可用来作为操作的实例。在表8-2中另外的10个作为验证范例。共有9个神经网络被操作，神经元的数目在隐藏层中从20到100的范围内。经几次测试后，在 *RCR* 标准下它们作为收敛处理。然后应用10个验证范例，对每个范例的相对概算误差 *REE* (relative estimation error) 进行计算式：

$$REE_i = \frac{Cost_{i,e} - Cost_{i,a}}{Cost_{i,a}} \tag{8-3}$$

式中 $Cost_{i,e}$——概算成本；

$Cost_{i,a}$——范例i的实际成本。

操作9个不同的神经网络，对于10个范例的 *REE* 结果表述在表8-3中。最后一列是10个范例的 *REE* 平均值。

表8-2　历史数据样本

序号	CF_1	CF_2	CF_3	CF_4	CF_5	CF_6	CF_7	CF_8	CF_9	CF_{10}	CF_{11}	CF_{12}	CF_{13}	CF_{14}	CF_{15}	CF_{16}	CF_{17}	CF_{18}	CF_{19}	成本/美元
1	0.063	0.006	0.0002	0.05	0.13	0.75	0	0.17	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	42 000
2	0.063	0.003	0.0015	0.027	0.10	0.30	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.15	0.12	0.10	0	35 000
3	0.063	0.5	0.0583	0.247	0.20	0.63	0	0.33	0	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.12	0.10	0	190 000
4	0.063	0.4	0.0058	0.2	0.20	0.50	0	0.33	0	0.5	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.12	0.10	0	214 590
5	0.063	0.004	0.0002	0.05	0.13	0.75	0	0.17	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	40 000
6	0.125	0.1	0.0132	0.267	0.20	0.30	0	0.5	0	0	0.15	0.20	0.20	0.10	0.67	0.17	0.12	0.10	0	80 000
7	0.125	0.006	0.0034	0.077	0.10	0.10	0	0.08	0	0.375	0.20	0.20	0.10	0.10	0.67	0.15	0.10	0.10	0	48 000
8	0.125	0.605	0.0021	0.07	0.10	0.50	0	0	0	0	0.20	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.10	0.10	0	71 000
9	0.125	0.3	0.0074	0.083	0.20	0.50	0	0.33	0	1	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.17	0.12	0.10	0	62 000
10	0.063	0.008	0.0022	0.26	0.10	0.63	0	0.17	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.50	0	40 000

表 8-3 验证范例的相对概算误差

隐藏层中神经元数目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	*REE* 平均值
20	2%	25%	43%	-27%	8%	-6%	-1%	-35%	68%	10%	23%
30	7%	31%	43%	-24%	13%	-8%	-6%	-37%	42%	18%	23%
40	17%	9%	9%	-30%	23%	-4%	-18%	3%	40%	-23%	17%
50	7%	29%	43%	-26%	13%	-1%	-8%	-37%	48%	15%	23%
60	10%	63%	3%	-10%	15%	3%	-30%	-6%	29%	-5.5%	22%
70	**-7%**	**0%**	**-4%**	**0%**	**-3%**	**-9%**	**-14%**	**-4%**	**-5%**	**0%**	**4.6%**
80	-12%	-9%	9%	-9%	-8%	-9%	-10%	7%	58%	-23%	15%
90	7%	-11%	-1%	-16%	13%	-6%	9%	6%	21%	-3%	9%
100	10%	-9%	8%	-17%	15%	6%	-26%	6%	44%	10%	15%

神经网络在隐藏层中有 70 个神经元时可得到最好的结果，而其他数目的结果则很差，操作中有明显的不正常。$NN_{0\to\infty}$ 的神经网络覆盖了模具中整个范围的成本。在 10 个范例中，*REE* 的平均值是 4.6%，范例 7 有最大的 *REE* 值，为 14%。对于早期注射模成本概算，这个结果很让人满意。

8.4.4 不同成本范围的神经网络

当范例的成本范围很大时，操作中很难找到神经网络能容纳范例的最大和最小两头的成本。这涉及要取得最好神经网络的构造和参量问题。举例来说，在表 8-3 中除了隐藏层的 70 个神经元外，其他验证范例生成概算误差很大。解决这个问题的途径是对神经网络建立不同成本范围。在目前的研究中，已注意到在图 8-2 中有 43 个范例的成本小于 6 万美元；另外 49 个范例的成本大于 6 万美元。因此，决定建立起两个神经网络来处理这两组范例。这两个神经网络通过测验来决定隐藏层的神经元数目。它们的结构是相同的，是如 8.4.1 节中所描述的。操作的步骤和程序也与 8.4.2 节描述的一样。在表 8-2 中的验证范例被用来测各自的操作网络。

因为 43 个范例成本小于 6 万美元，所以测验 9 个神经网络。在表 8-2 中 10 个范例中的 6 个（编号 1、2、5、7、9、10）成本小于 6 万美元，所以测试它们。测试 9 个不同的神经网络来为 6 个范例服务，*REE* 结果在表 8-4 中列出。其中的最后一列是 6 个范例的 *REE* 的平均值。在隐藏层的 70 个神经元产生了最好的结果，*REE* 的平均值为 3.1%。其他的神经网络也产生了很好的结果。70 个隐藏的神经元表达为 $NN_{0\to60K}$。

表8-4 验证范例的相对概算误差（<6万美元）

隐藏层中神经元数目	1	2	5	7	9	10	*REE* 平均值
20	19%	11.4%	25%	-3.5%	-5%	0%	10.6%
30	17%	2.9%	23%	-3.5%	-5%	-2.5%	8.8%
40	4.8%	-11%	10%	-1.4%	-5%	0%	5.4%
50	-4.8%	5.7%	2.5%	8.8%	-5%	2.5%	4.9%
60	2.4%	5.7%	7.5%	8.8%	-3%	-2.5%	5.0%
70	**-2.4%**	**0%**	**2.5%**	**8.8%**	**-5%**	**0%**	**3.1%**
80	-2.4%	-10%	2.5%	4.7%	-6%	-2.5%	4.8%
90	-2.4%	8.5%	5%	4.7%	-5%	-2.5%	4.7%
100	-9.5%	2.8%	-5%	8.8%	-5%	-2.5%	5.6%

因为49范例成本大于6万美元，所以9个神经网络同样要经过测验。在表8-2中10个范例中的4个（编号3、4、6、8）成本大于6万美元，所以它们也被用来测试。测试9个不同的神经网络来为4个范例得出*REE*结果，如表8-5所示，其中的最后一列是4个范例的*REE*的平均值。在隐藏层中的80个神经元产生了最好的结果，*REE*的平均值为3.1%，这个神经网络表达为$NN_{60K\to\infty}$。另一方面，测试其他两个神经网络，在隐藏层中有30到100个神经元，同样也产生较为令人满意的结果。也在不同成本范围内，增强了对各工件不同系统网络的操作功能。利用这种方法，对某个成本范围很容易寻找并操作适合的神经网络。

表8-5 验证范例的相对概算错误（>6万美元）

隐藏层中神经元数目	3	4	6	8	*REE* 平均值
20	-11%	-21%	113%	139%	70%
30	0%	-18%	4%	8%	7.5%
40	2%	-48%	28%	42%	30%
50	2%	-48%	28%	42%	30%
60	2%	-14%	39%	8%	15.6%
70	16%	0%	1%	-7%	6%
80	**-5%**	**-2%**	**3%**	**-3%**	**3.1%**
90	22%	-27%	-8%	8%	16%
100	3%	-10%	5%	-6%	5.8%

在目前的三个测验神经网络中（$NN_{0\to\infty}$，$NN_{0\to60K}$和$NN_{60K\to\infty}$），必须有一个

是注射模塑新制品成本概算的策略。在这里，成本概算过程分为三个阶段。

1）给出新模塑制品和成本相关因素 CF_s 抽提取和量化。

2）应用 $NN_{0\to\infty}$ 概算模具的成本 $Cost_r$。

3）如果 $Cost_r < 6$ 万美元，应用 $NN_{0\to 60K}$ 生成模具的最终概算成本。其他情况，应用 $NN_{60K\to\infty}$ 最终生成模具的概算成本。

8.5 综述

传统的模具成本评估存在一些问题。因为在早期的成本概算无法利用成本函数形式，也不能利用实用的历史成本数据来直接校正成本概算的算法。应用神经网络的成本函数近似处理方法，目前已表明，即使不能消除，也能减轻这两个问题，但这种处理方法能应用于注射模的成本概算。不仅在模塑制品设计和模具概念设计阶段，而且在早期的估价阶段都要定义注射模的成本相关因子 CF_s，并进一步安装这些有效的信息。对所有这些 CF_s 可能状态，CF_s 的量化方案已经建立。从先期生产的一些模具，工件范例 CF_s 的各自提取和量化，使其与它们的实际成本一致。已经开发的神经网络的程序经过了构造、操作和验证。验证结果证实，此方法能够得到满意的概算成本，进一步又提出并说明了对不同的成本范围，操作使用不同的神经网络能得到更好的结果。

总之，这种早期成本概算方法有如下优点。

1）成本相关因子 CF_s 概括了模具概念设计和零部件设计中所有方面的成本。行情工程师和模具设计者能轻松提取这些因素。

2）没有必要知道成本函数的实际形式。利用先前的生产模具/零部件设计和它们的成本数据，逆向传输神经网络，通过近似函数引导它们的关系。

3）以神经网络的操作形式建立的成本函数可以被修改。用新的范例一次又一次调整自身来适应新的制造环境，然后再重新测试神经网络。

另一方面，这种方法也受到某些限制。首先，隐藏层的数目和每个隐藏层的神经元有操作—误差的进程。它会浪费时间，且不能保证最后的选择结构是最好的。第二，成本方面的 CF_s 研读困难。此外，流行的神经网络模式不能给设计者提供更好解决问题的工具。

参考文献

[1] M.M. Andreasson and J. Olesen, "The concept of dispositions", Design, Vol. 1, No. 1, pp. 17-36, 1990.

[2] H.H. Jo, H.R. Parsaei, and W.G. Sullivan, "Principles of concurrent engineering," Concurrent Engineering – Contemporary Issues and Modern Design Tools, Chapman & Hall, London, pp. 3-23, 1993.

[3] K. Nichols, "Getting engineering changes under control", J of Engineering Design, Vol. 1, No. 1, pp. 5-16, 1990.
[4] P. Dewhurst and G. Boothroyd, "Early cost estimating in product design", J of Manufacturing Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 183-191, 1988.
[5] G. Boothroyd and C. Reynolds, "Approximate cost estimates for typical turned parts", J of Manufacturing Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 185-193, 1989.
[6] G. Boothroyd and P. Radovanovic, "Estimating the cost of machined components during the conceptual design of a product", Annals of CIRP, Vol. 38, No. 1, pp. 157-160, 1989.
[7] C. Poli, J. Escudero, and R. Fernadez, "How part design affects injection-molding tool costs", Machine Design, November 24, 1988, pp. 101-104.
[8] L.S. Wierda, "Product cost-estimation by the designer", Engineering Costs and Production Economics, Vol. 13, pp. 189-198, 1988.
[9] M.S. Hundal, "Design to cost", Concurrent Engineering – Contemporary Issues and Modern Design Tools, Chapman & Hall, London, pp. 330-351, 1993.
[10] N.S. Ong, "Activity-based cost tables to support wire harness design", International J of Production Economics, Vol. 29, pp. 271-289, 1993.
[11] Y.F. Zhang, J.Y.H. Fuh, and W.T. Chan, "Feature-based cost estimation for packaging products using neural networks", Computers In Industry, Vol. 32, pp. 95-113, 1996.
[12] Y.F. Zhang and J.Y.H. Fuh, "A neural network approach for early cost estimation of packaging products", Computers and Industrial Engineering, Vol. 34, No. 2, pp. 433-450, 1998.
[13] T. Khanna, Foundations of Neural Networks, Reading, MA: Addison-Wesley, 1990.
[14] The MathWorks Inc., Neural Network Toolbox for Use with MATLAB, 1993.
[15] S.K. Lim, A neural network approach for early cost estimation of plastic injection molds, B.Eng. thesis, National University of Singapore, 1996.
[16] A. Sharifuddin, Early cost estimation of injection molds, B.Eng. thesis, National University of Singapore, 2000.

第 9 章　个案研究：模具设计的 IMOLD® 和 IMOLD-Works

9.1　模具智能设计和装配系统

传统的计算机辅助注射模具设计是直接通过 CAD 系统来完成的。一些嵌入的应用模块，使模具设计过程中某些部分的自动化有所发展，它允许工程师选取最好的应用模块添加到系统中去。本章以模具智能化设计的范例，讨论独立专用的模具设计软件。这种商品化 CAD 系统有较低程度的三维实体核心支撑。模具智能化设计软件原本企图实现自动化模具设计，但在编制中因模式化复杂并且受到能力的限制，尚不能充分商业化。本章将详细介绍一款优秀的模具设计智能化商业软件，与 UNIX/Linux 的平台相比较，这种软件以视窗设计环境建立，具有对用户友好的集成能力、易于操作、便于掌握和功能丰富等优点。

9.1.1　模具设计系统的基础知识

前曾提到，注射模具设计是项复杂的过程，它需要知识面宽广且有经验的模具设计师。现在 CAD 系统的设计工具已经替代了传统的图板，设计过程强化了多维几何实体的应用。模具设计起动后，很少停留，必须多次修改，所以设计是昂贵的。在此情况下，零部件的参量需要反复计算。每个模具零件之间的复杂关系，使得设计过程沉闷和耗时。因此，自然需要开发专家系统 KBE（knowledge-based expert），自动地完成从塑料制品到注射模设计的全过程。在 KBE 设计系统中，注射模设计工程的经验和基础知识被收集和存储。依赖此智能系统能很好完成常规和重复的任务，且可有效缩短设计周期。

首先尝试在柯达（KODAK）的爱斯基摩（ESKIMO）项目中，实现注射模设计的 KBE 系统的想法[1]。重点在于模架而不是模具本身。模具内部由各种机构和系统的零部件共同组成，诸如脱模系统、浇口和流道系统、侧向滑块机构和内侧滑杆机构等。注射模塑制品设计的 KBE 系统，同样由 Pratt 和 Sivakumar[2] 报道过。该系统能让设计者既结合生产又应用制品几何体加工的知识，以混合特征进行制品设计。系统中关于模塑性能、强度、工艺、材料选择和模具设计的工艺规程模块引起了人们的注意。另一方面的成果可在文献[3,4]中读到，开发的专家设计系统的方法已应用在智能化 CAD 系统中。其中已经报道的几个完全或半自

动模具设计系统，都具有完整的模具设计功能。

另一个与模具设计理论相类似的KBE系统，已经得到智能化计算机辅助设计ICAD（intelligent computer aided design）的补充[5]。在这种处理方法中，制品的工程知识作为生产模式被收集和储存。设计工程师能很快地完成新的设计。能容易地通过改变输入的生产模式，或者修改和扩充已有的生产模式来更新设计。这使设计者自由增加处理工程任务的时间，如反复计算等。也有了更多时间从事创造性工作。为制品设计附加三维几何模型后能包含在各种输出里，如工程成果报告和工程数据分析等。也能够下载至CAD系统构成材料清单和制造说明书。

在Allegro LISP的顶层设置平台，利用上述IDL（ICAD Development Language）的CAD智能化的开发环境，作为对象的语言推动智能化为基础系统的开发。一些专家系统的普遍特征，如框架、信息网和母子关系等被编入。制品的参量化和概念化设计同样也得到探究和实行。制品模型被专门输入来应用工程规则或生成制品。在此情况下，技术要求的输入是以模塑制品的模式通过用户界面完成的。由于ICAD环境下进行实体模型处理的工具有限，在输出到ICAD前，制品模型的特征部分，在Unigraphics CAD/CAM系统（UG-II）中进行预处理[7]。此方法要求制件实体模型具有系统格式，能接受工程规则处理。只有接受了零件实体模型，系统才能在不影响其他部分的情况下，得以维持和修改。面向对象的方法在始创时，要考虑有效地管理庞大的程序扩展。为了能实现完整设计，每个实体构件都能和其他零件相关联。因此，在每个实体构件的模型设计期间，要特别注意确保其造型不但满足自身要求，也能被其他实体模型所利用。举例说，当需要创建浇口时，KBE系统将能方便地寻找到相似的构件模型，并在它的基础上创建起来。完整的智能化设计算法是基于信息网络基础上的，要处理好定义的特征和不固定特征之间的关系，并确定设计约束和不同的结构链，如图9-1所示。用KBE模具设计系统，输出的注射模设计，如图9-2所示。然而，由于KBE应用语言的复杂性，又因环境中操作处置实体模型的限制，该系统没有在工业中得到商业化。商业化CAD/CAM系统的混合合并，简化了实用计算机辅助模具设计的开发任务，其集成系统将在下节陈述。

9.1.2　IMOLD®概要

模具设计和装配综合系统，IMOLD®[8,9,10]，最早在新加坡国立大学得以开发。这是一款智能化设计软件，能强化模具设计，并在注射模具设计的过程中应用专业知识。IMOLD®系统对整个模具设计的进程提供了设计模块，包括分型、型腔布局、浇口和浇道、模架、滑块、冷却、脱模、电极和热流道等。该软件可以帮助模具设计者减少设计时间，同时提高设计的质量。

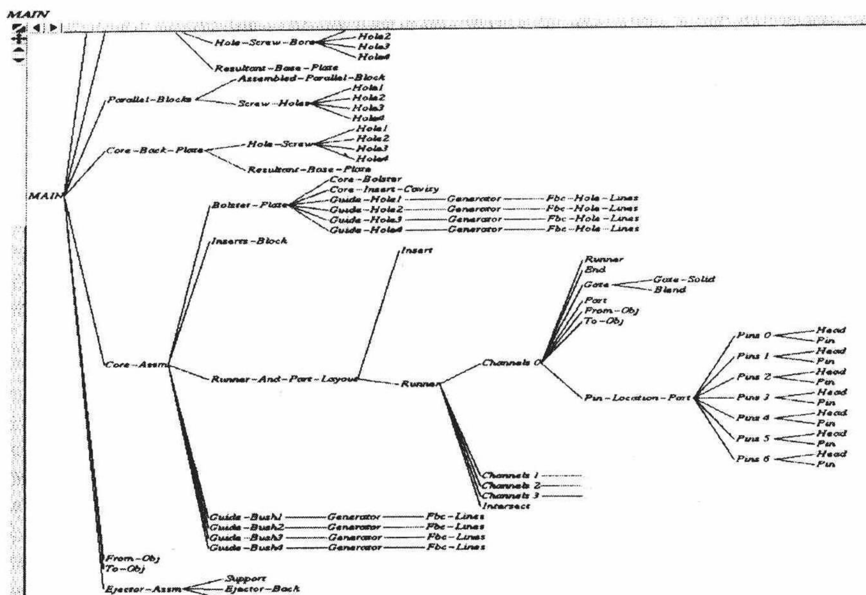


图 9-1　面向模具集成的结构链

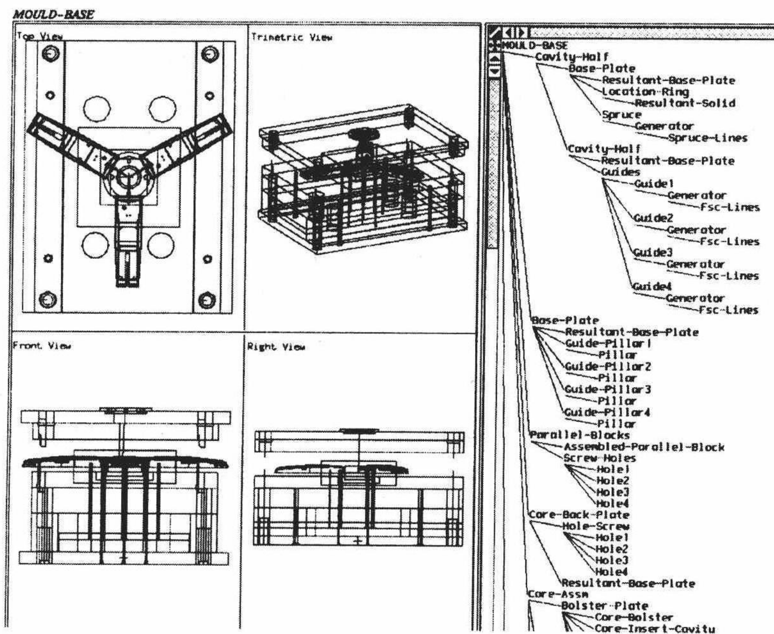


图 9-2　在 KBE 系统中注射模设计和装配的输出[9]

早期版本构筑在UG系统的顶层上，智能设计模式的IMOLD®系统（v2～v5），是完全应用三维实体模型基础上的设计进程。它是连同UG一起发展起来，专门为模具制作者提供的必要工具。它使模具设计者能快捷创建设计工具，这些工具允许模具设计者专注在模具设计方面，而不是CAD系统的操作上。既然IMOLD®是模具设计的应用软件，模具设计者自然地要用它来创建与其设计相协调的方法。由三维制件模型输入开始，它提供了一些功能模块来帮助用户完成模具设计全过程，从型芯和型腔创建到冷却和脱模系统的设计。输出则是个完整的三维模具装配体，为模具制造者提供它的零部件集成或分离的个件。

IMOLD®的两个显著的特点，是参量模式化和设计任务的自动化[11]。参量模式化使得简明的数据库能容纳范围很广的有相似形状的零部件。此外，冗长的几何操作任务，如型芯和型腔的创建和集成都可以自动完成。而且，许多的工业设计知识和实际已经结合了注射模各功能零部件的参量化模式。设计任务简化成为简易挑选合适的备用零件了。

在模具的装配体中一般有上百个零部件。有效地管理大量的零部件就成为计算机辅助注射模设计的问题所在。应用UG中的集成导航工具，模具中所有的零部件，按照所有的零件间的装配关系放置在阶层结构中，即集成的分枝链。每个分枝节点代表了装配体或零件。相关联的节点为母子节点。在同一根枝干上的子节点享有同一母节点，它们由装配约束联结在一起，诸如配对、定位及各自归属的参量等。这种集成链的结构能一目了然，更重要的是能用作可编辑的窗口。用户能方便浏览分枝，为修改而点击节点。节点的改变将会推动与其他相关节点的连接。IMOLD®可在模具设计的任何时候为制件的模型创建集成的结构链。结构中有详细的标签文件，指明模具设计中的零部件。所有这些零部件都有个前置名作为前缀。它由用户指定配制模块中数据。在结构链的层次中各种零部件很容易识别和存取。图9-3展示了UG集成导航的示例，包含参量化的设计工具。

9.1.3 开发平台

IMOLD®系统最初在UG系统中开发，在UN IX的环境下应用C语言编写。之所以选择UG，是因为它允许用户利用UG/开放式API（Application programming interface）程序应用界面[13]，来创建自制的系统。它因参量化既支持用户识别特征设计，也有能力提取设计信息。API包含有大量的可供用户调用的函数/子程序，能进入UG图形终端、文件管理和UG的数据库。在UG平台和添加的应用模块之间，它提供了易懂又友好的界面。UG为用户提供了软件工具UFUN[14]，使得在UG和外挂应用软件模块之间有足够方便的界面。

9.1.4 功能模块

IMOLD®由11个不同的功能模块和一个实用模块组成。应用它引导模具设

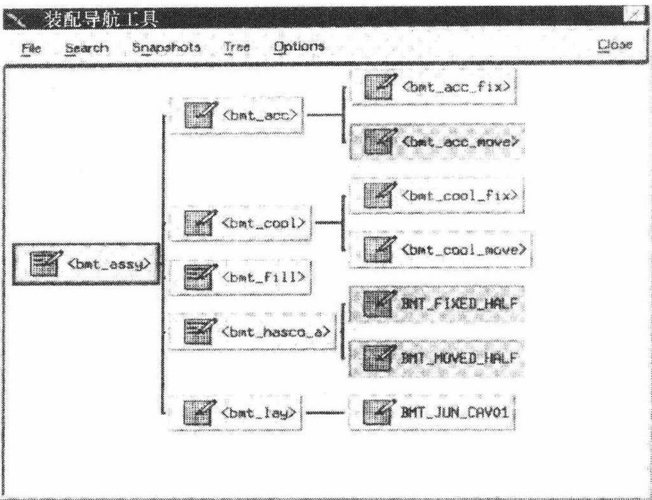


图 9-3　IMOLD®装配结构[12]

计者经历模具设计进程的每个方面。IMOLD®包含了完整的模架和零部件库，更为重要的是它提供了强大工具，可以快速定义分型面、嵌件、滑块和滑杆几何体。在 UG 混合模式和装配体的项目里，IMOLD®自动提供了这些选项。如图 9-4 所示，IMOLD _ V4. 1[12]栏的下拉菜单里，提供了这 11 个功能模块。第 12 个模块在工具栏 IMOLD _ tool 中选取。它们嵌在有 IMOLD 模块的 UG 菜单里。主要的模块列示如下。

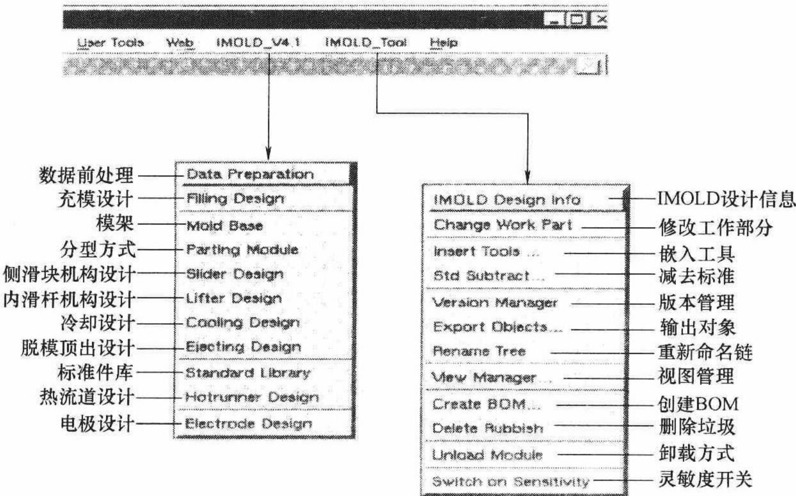


图 9-4　IMOLD®下拉菜单

（1）数据前处理

用于选择存取数据前处理方式。此模块用来加载制品模型，建立模具方向，应用收缩率因子，为型芯和型腔创建而定义包容盒体。

（2）充模设计

选择充模设计模块，如图9-5所示。该模块用来决定型腔数目、浇口和流道的构型。修改和删除布局，浇口和流道调用也在该模块中完成。

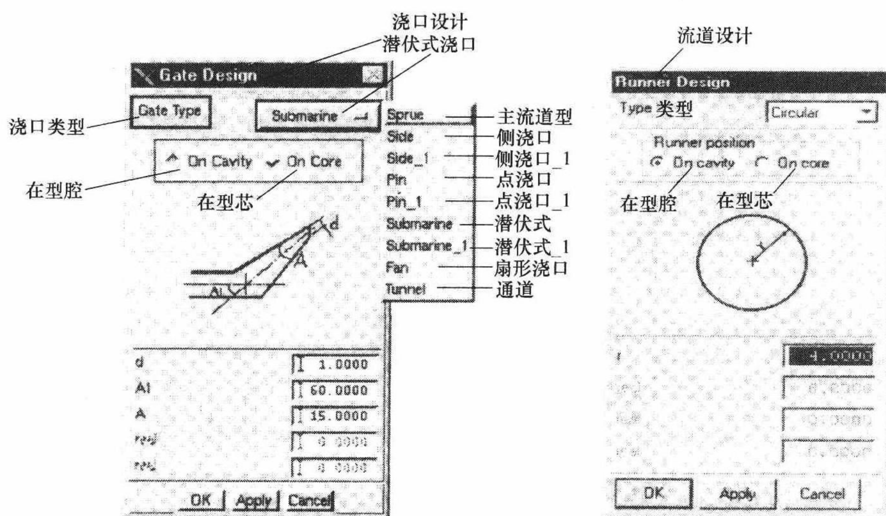


图9-5　充模设计菜单

（3）模架

选择模架模块，如图9-6所示。该模块用来加载模架以进入模具装配体。有不同品牌、系列和模架标准可供选择。

（4）分型

用于选择分型功能。该模块用来创建分型面，进而建立型芯和型腔。模具中的嵌件也在此进行设计。

（5）侧滑块机构设计

选择侧滑块机构设计模块，如图9-7所示。此模块用来设计侧滑块机构，具有斜导柱或弯销，有关滑块的导向和耐磨板都在这里添加。

（6）内侧抽机构设计

选择内侧抽滑杆机构模块，用来设计滑杆头和滑杆体。在这里提供了几个类型的个体。

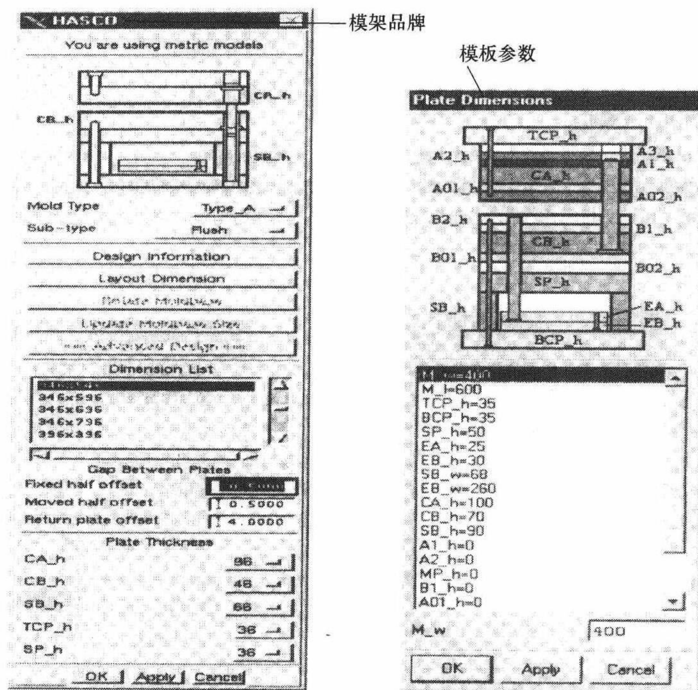


图 9-6　模架设计菜单

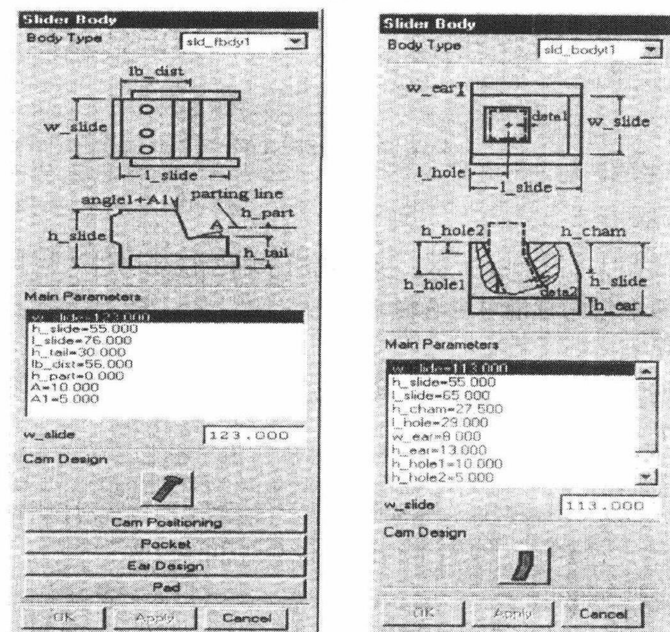


图 9-7　滑块体设计菜单

（7）冷却系统设计

选择冷却系统设置模块，用来设计冷却系统。这里提供了许多不同类型的冷却范型和附件。

（8）顶出机构设计

选择顶出机构的模块，用来设计制品脱模顶出机构。这里提供几种类型的顶出零件，都可由 IMOLD®按型芯进行自动修整。

（9）标准件库

选择存取标准件库模块，可为模具设计添加 IMOLD®支持的标准件。

（10）热流道的设计

这是个选择性模块，它打开热流道设计功能，如图 9-8 所示。该模块用来设计热流道系统中流道板、喷嘴和流道。

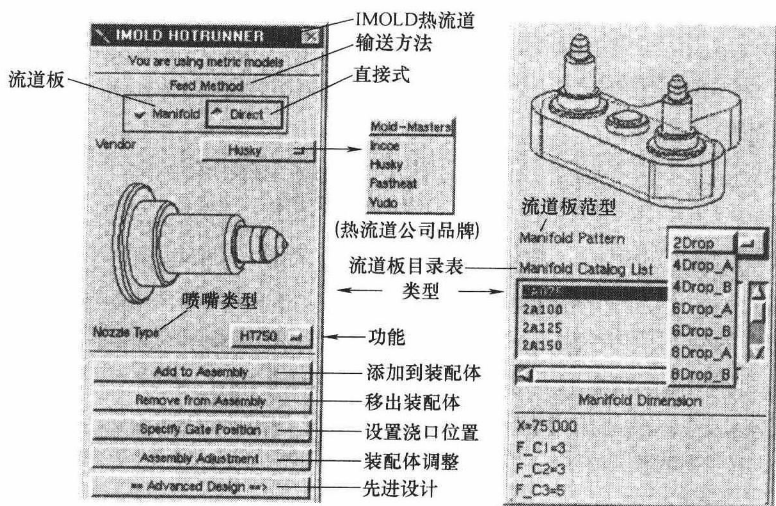


图 9-8　热流道设计菜单

（11）电极设计

这是另一个选择性模块，它打开电极设计功能。此模块用来设计复杂形状电极的几何体和装夹电极的支架工具。

9.2　模具设计视窗和装配系统

这些年来，模具设计工程师必须运行两种不同的系统，UNIX 和 PC。前者广泛应用在工程中，后者则主要用在中小型企业。工程师同时也需要在公司办公室动用一些 word 文本、页面和工程管理工具，但并不在 UNIX 的工作站进行。所

以迫切的需要基于窗口平台的新型模具设计应用软件。为了切换到 Microsoft Windows/NT 系统，软件的开发应有足够的适应性，且运行方便，使用灵活。基于视窗平台的软件开发成本低，也提高了软件的利用率，因此越来越多的工程师在日常工作中应用 PC 系统。

在本节中，将介绍在 Parasolid 和 Solidworks 平台上以实体模型化图形的 PC 为基础的模具 CAD 应用技术的开发。由于实体造型在商业 CAD/CAM 系统中已广泛采用，Parasolid 被选用为核心平台。基于 Windows 的注射模具设计系统构建和实行的每个功能，都将作简明的介绍。

9.2.1 三维 CAD 视窗系统

高端的三维实体造型系统已经在工程师工作站得以应用。多年来已用于大型飞机、消费产品和汽车等制造企业。现在很多小型企业都从工作站转用了 PC 机。Windows-native/NT 的适应性和先进性的提高，足以使开发者创建的应用软件普遍适用，并易于掌握。高端用户找到了中等范围的实体模塑化，Parasolid 就迎合了这种需求。

基于 Windows 平台的新型模具设计应用的软件有很高的需求。实用能力、高功能执行、易于操作、标准化和增加的工作效率等，都大大缩减了现今的成本，导致了 UNIX 环境的运行在软件向 Windowa NT 转移。因此，在 NT 或 Windows 系统下的实体模型器（solid modeler）软件，如 Parasolid 和 SolidWork 都将在设计者和各公司的流行。在 Windows 环境中，设计者将会采用标准的 Windows 界面和函数（如切割和粘贴），这样就可以使桌面（desk-top）的设计任务更友好，并可降低成本。另一个使用 Windows/NT 为开发平台的原因是因为它的适用性可使开发的应用软件更易普及，并且更易使用。

1. Parasolid 的核心

边界-实体造型支持自由格式的表面设计，对机械 CAD/CAM/CAE 的应用软件很有用。其广泛的功能提供了面向对象的程序化界面。实体模型器（solid modeler）可实现以下功能。

1）创建和操作实体对象。

2）计算质量和惯性矩，实施干涉检测。

3）以多种图形方式输出对象。

4）在各种数据库中存储对象，然后归档和恢复。

Parasolid 提供了强大的实体模型[15]。生成单元的模式化及综合表面/层面的模型化的性能，使 CAD/CAM/CAE 系统能够很快地投入市场。Parasolid 的模型文件有很好移植性能。它也因此成为开发独立应用软件的上级平台。它用边界来描述实体和其他类型个体。Parasolid 有三种相互关系方面的应用：设置在顶层的

两个模型器；模型器功能控制工具和处理对象的应用模型；PK（Parasolid kernel）共生实体核心界面和KI（kernel interface）核心界面。当它需要实行数据强化或系统类型操作时，称为模型器。其他界面为“低值”的模型器。下面的界面有三部分：数学解析几何体（Frustrum）；图形输出GO（graphical output）；外来几何体（foreign geometry）。

图9-9展示了Parasolid和这些界面应用间的关系。其中PK界面是对Parasolid提供的函数库通道。核心界面KI是Parasolid的原始界面，它的功能现在已经几乎完全被PK所替代。然而，仍有一些领域需要使用KI核心界面程序。在需要时，PK功能和KI程序能混合在应用软件里。数学解析几何体函数Frustrum必须写在应用软件程序中。所需要的储存或者恢复数据从核心层调用。应用软件首先需要决定安排Parasolid输出，再通过几何体函数管理数据储存。

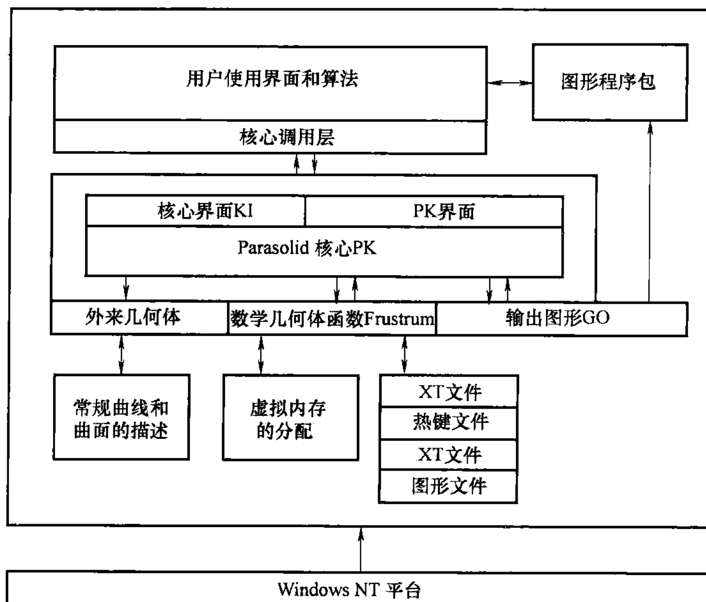


图9-9　Parasolid及其应用的关系

数学几何体函数的数据转换通常包括读写文件。文件的格式和位置在编写几何体函数时决定。图形输出GO函数也必须由应用软件编写。与几何体函数不同，不是从这些函数中输出数据文件，而是从核心模块构成图形系统。类似数学几何体函数那样，输出图形GO函数可被核心模块调用。Parasolid将调用GO函数，当涉及到绘制一些制件时PK核心有个能执行的函数。核心在配制绘图数据片段时调用一个执行函数，会产生多次调用图形输出的GO函数。

2. SolidWork 平台

SolidWorks 增添管理系统后，允许用户在 SolidWorks 使用期间的任何时间控制加载的第三方软件。加载了一个以上的软件包后，SolidWorks 设置对话通道将会保持。基于 SolidWorks[16] 以 Windows 为平台，允许工程师选择最好的应用软件添加进去。之所以选择 Windows 设计环境作为平台，是因为它具有强大集成能力，且具有使用容易、学习快速和价格适宜等优势。SolidWorks 及其 API 程序应用程序，对注射模具设计的应用软件 IMOLD-Works（IMOLD® for SolidWorks）提供了很好的支持，图 9-10 展示了 SolidWorks API 的对象[17]。

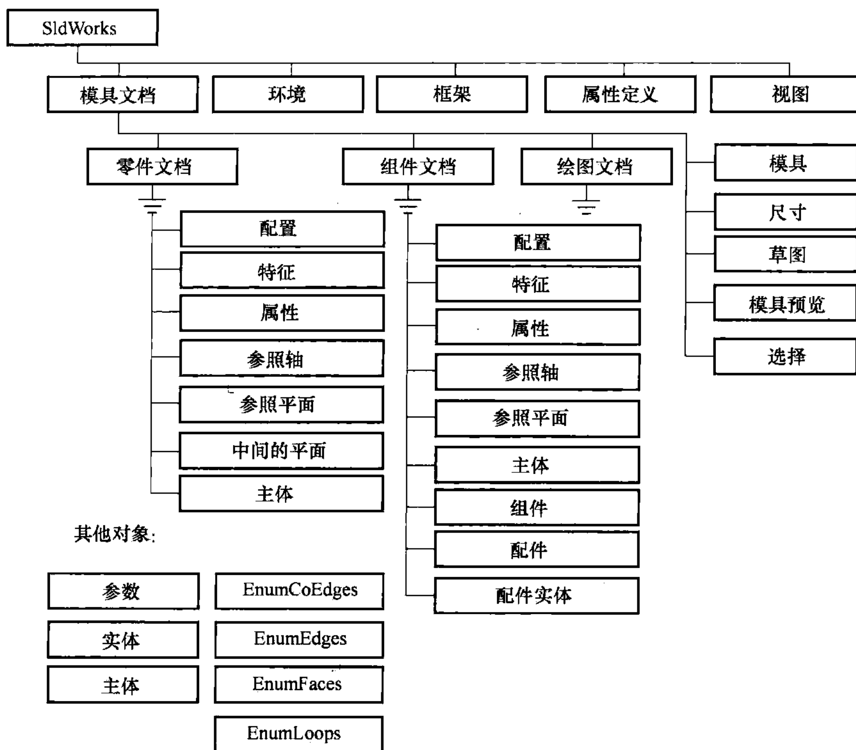


图 9-10 SolidWorks 程序应用界面 API 的对象

基于 SolidWorks 的 IMOLD，或简称为 IMOLD-Works[18]，如图 9-11 所示，是一个在 Windows 平台中运行的三维模具设计应用软件。IMOLD-Works 将 CAD、CAM、模具商业化信息和模具零部件综合集成一个数据库中，比起传统的 CAD 软件，能够更快地完成模具设计。该系统给设计者提供交互式的计算机辅助设计环境，既可以加快模具设计进程的速度，又可以促进其标准化，进而提高制造的速度。IMOLDWorks 在 Windows/NT 系统中运行，具有 C++ 语言代码视窗化界面，又嵌套在 Solid Works 软件里。图 9-12 展现了它的主要结构和功能模块，几乎覆

盖了模具设计的全过程。

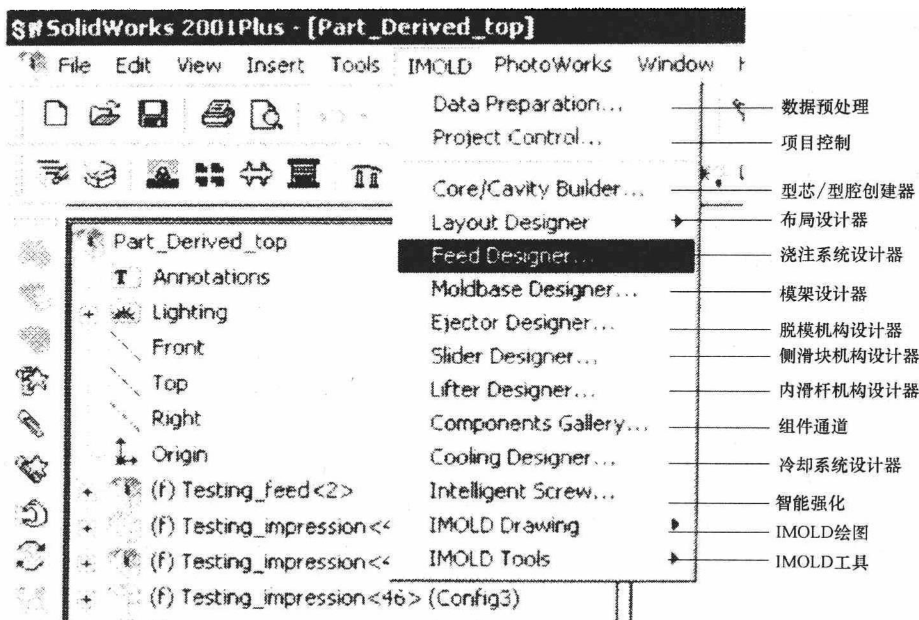


图9-11　在Windows/NT环境下运行的模具设计系统（IMOLD-Works许可）

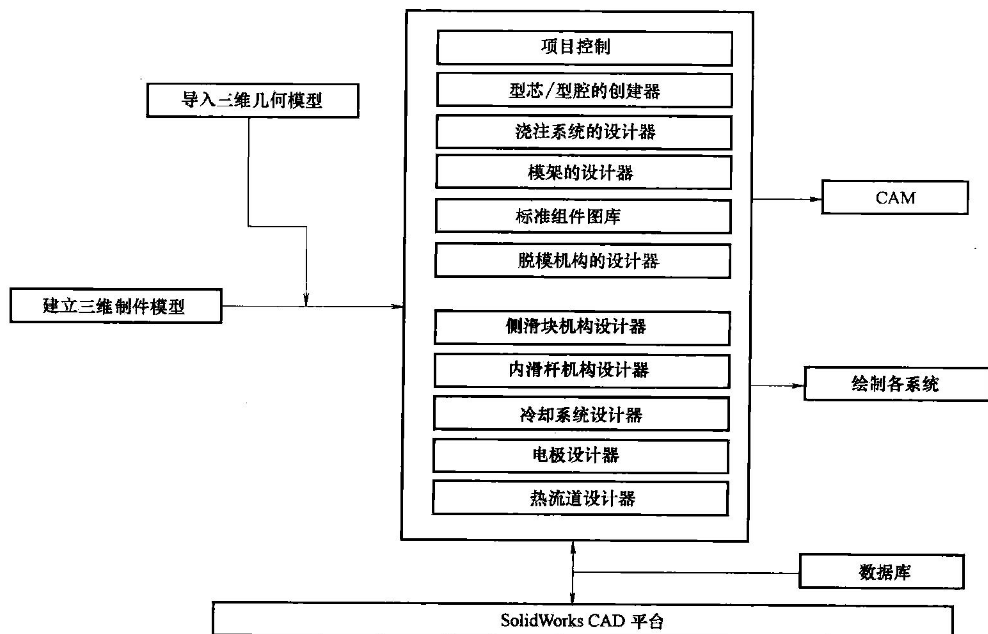


图9-12　在IMOLD-Works的结构和功能模块（V4.0版下开发）

IMOLD-Works 的开发成功，提供了一系列的辅助模具设计工具。软件提供的工具模块有如下几个领域[19]。

（1）数据准备

数据准备模块将帮助设计者准备制品的模型。设计时应注意以下应用条件：如果制件的分开方向不是沿着 z 轴的，如果用户并不想按市场上原始制品完成模具设计。此模块将会帮助设计者准备制件，可随意修改成最终制件，而且考虑到后续的型芯/型腔的创建操作。

（2）项目控制

项目控制模块是设计工程开始或继续的入口。它允许用户加载目前的项目或者开始新工程项目。通过这个模块，用户也可以定义项目代码和单位，制品的材料种类和相应的收缩率。设计者也可按所需方向确定各收缩率的比值。

（3）型芯/型腔创建器

该模块提供了创建型芯和型腔的工具。所有的这些工具分为两个不同的进程：标准的和先进的型式。这取决于成型制件，设计者可以取其中的一个来创建型芯和型腔。这些进程能辅助设计者保证在制品与型芯和型腔嵌件之间的联结关系。

（4）布局设计器

该模块对多型腔模具提供了布排型腔的设计工具，以及布局编辑和转换任何型腔的工具。

（5）浇注系统设计器

该模块的全新界间有了很大的改进。它为浇口和流道系统设计提供了工具。可参量化建立潜伏式浇口和扇形浇口，用户能轻松设计浇口并将它添加到布局中。可按设计的需要供给直线型和 S 型的流道。浇口和流道能自动地从嵌件中切除出来。

（6）模架设计器

该模块允许设计者预览事先加载的各商家的模架。点击鼠标用户还能添加双脱模机构、制定模板厚度和确定零件的位置。当用户最终确定了要设计的模架，设计者可在模板中放置零件并去除任何不必要的零件。IMOLDWorks 可以设置全部系统，用户甚至可以创建各个企业所需的新模架。

（7）脱模机构设计器

该模块能让用户添加标准顶杆，这些顶杆由用户从各商家挑选后装载的。它还允许用户通过它的界面设置商家的顶杆并方便修剪它们。用户点击鼠标即可修剪所有顶杆并插入到型芯的表面。它还具有从模板上去除脱模零件的功能。

（8）组件通道

该模块为设计者提供范围广泛的常用标准零部件。用户既可从目录中选择标

准尺寸零件，并容易地将其添加到设计图中，也能将零部件移除。组件通道可保证满足零件连接的配合条件。

（9）侧滑块机构设计器

该模块能组建标准滑块体及内部附件，允许设计者添加任何侧型芯或“滑块成型头部”，以使在注射模塑周期里成型制品外部的侧凹槽。软件在自动设计滑块时能参照滑块的位置，并考虑处置位置数据、行程和斜导柱倾角。滑块设计器的数据库中有标准滑块体和派生的两种滑块。

（10）内滑杆机构设计器

该模块除了用可内侧凹槽情况外，类似于侧滑块机构设计器。设计模块能参考滑杆位置，考虑处理位置数据、行程和位移角度。内滑杆机构设计器能打开数据库中的标准滑杆体和派生的滑杆。

（11）冷却系统设计器

该模块提供了易于进行冷却回路设计的工具，用于专门的冷却线路设计。回路确定后，它也能按设计者的意图改变对设计作出修改。另外，冷却系统设计器也考虑到了制造问题，提供钻孔和扩孔功能。

（12）IMOLD®

该模块能绘制自动创建的型芯和型腔的模具图，也能从视图上方便拾取所定义的剖面。

9.2.2 系统的执行

大多数CAD系统仅提供了几何体模型化的功能，以便于进行造型及制图的操作，但不提供给设计者所必需模具设计知识。预见到这些情况，IMOLD®和IMOLDWorks发展了高端的三维模式平台，以利于模具设计进程。这种配置在很多方面都有优势。三维模式平台提供了具有功能库的嵌入式模块，建立了用户界面，并实现了设计程序化。结果使这些添加软件的开发时间大大缩减。图9-13展现了两个添加的应用软件结构，一个是UNIX为基础的在UG中的IMOLD®；另一个是Windows为基础，添加在Solid Works中的IMOLD-Works。

以Parasolid为基础的注射模设计系统，已被Kong等人公开发布[20]。基于Windows的三维计算机辅助注射模设计系统，已经在Windows NT中得以运行。它应用了Visual C++语言的微软基础系列MFC（Microsoft Foundation Class）和实体模型化核心Parasolid V11.0。其主要优势在于Windows设计系统，建立在系统实体核心Parasolid上。因此，它不需要常用的CAD/CAM系统提供实体模型化和绘图的用户界面GUI（graphical interfaces）功能。系统建立在顶层的Parasolid核心之上，广泛地采用了许多CAD/CAM系统的交互式实体模型器，也因此可从其他设计和制造应用软件中获得良好的输入和输出的可能性。另一方面，如果模具

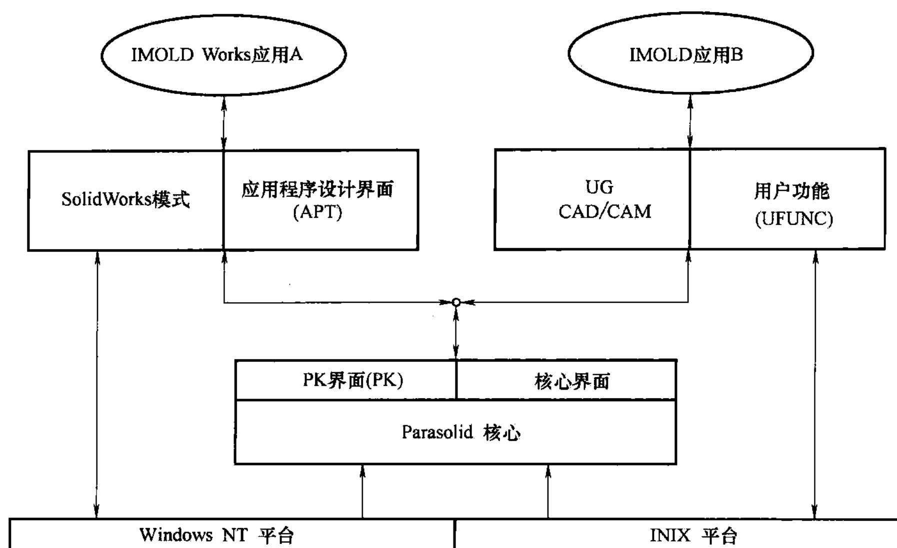


图 9-13 应用软件 IMOLD®的程序结构

设计系统建立在任何一个商业化 CAD/CAM 系统上，如 UG、Pro/E、SolidWorks、AutoCAD、CATIA 和 I-DEAS 等，在开发绘图的用户界面 GUI 和功能模式化方面的工作将被减轻，但是在这些核心软件版权方面成本将会很高。程序应用界面 API 提供给各商业化的 CAD 软件是有变化的，在这些商业化的系统软件里，不保证与 API 提供的基础能完全对接，并实现集成化。因此，在开发的 Windows 模具设计系统中采用系统实体核心平台 Parasolid 是个很好的选择。

9.2.3 图形的用户界面 GUI

图形的用户界面 GUI（Graphical user interfaces）是与用户高度友好的设计系统。设计界面允许用户每步的设想方案进程领先模具设计。图 9-14 展示的用户界面，是以 Parasolid 为基础的模型设计图标。此系统具有零部件和模架的创建功能，可方便创建模具。

如图 9-14 所示的已被开发的三维模型器，有以下功能：在用户界面用参数建立块、球、筒、圆锥体、圆环、棱柱和其他的片状体；以 Parasolid 格式创建文件进程函数，且能打开或存储；进行实体的转换；在实体创建中运用布尔运算。以 Parasolid 为基础的模具设计模式[21]，建筑在几个模块上，如数据准备、充模设计、模架和分型设计。这些模块都在工业部门做过测试，获得了良好的模具生成结果。该系统用目标对象的 Visual C++程序语言编写，保证了今后的开发和扩展。这种方法能实现塑料注射模设计的主要进程，也可以用于类似的压铸模具设计。

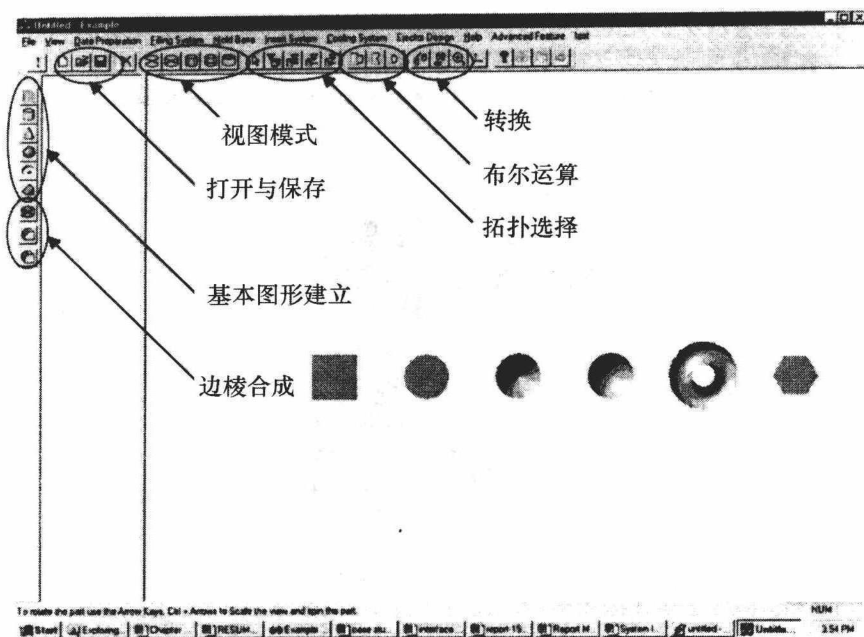


图9-14　基于Parasolid模型器开发的GUI

图9-15和图9-16所示的是注射件的设计分型过程示例，比在前面章节中提到的更完整。该示例制件有三个特别的特征：①存在不规则表面；②有阶梯分型面；③许多通孔的存在，需要考虑从外部分型面进行内部分型。在图9-15中，

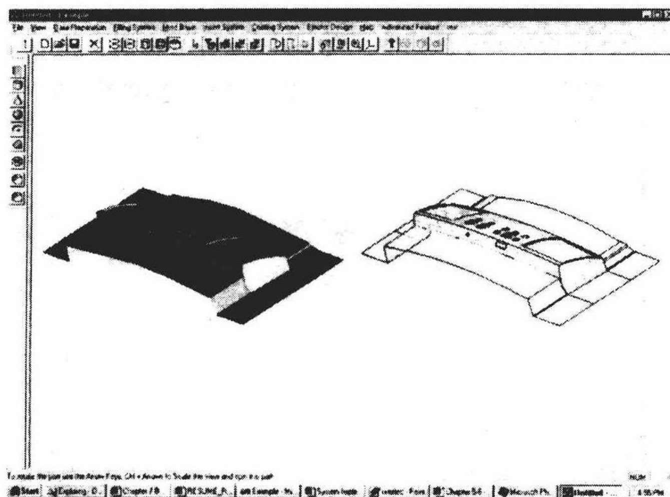


图9-15　分型面的创建（Parasolid平台）

外部的分型面被加亮，并且显示了延伸的方向。该示例利用了在先前章节提到过的界面。图 9-16 所示为型芯和型腔镶块的创建。

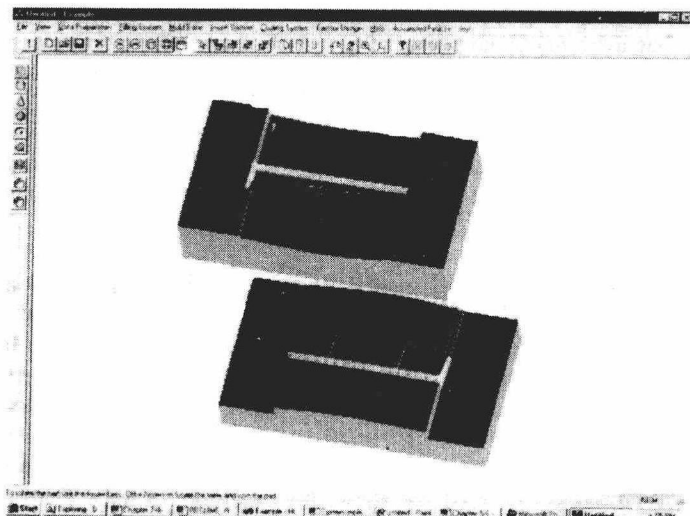


图 9-16　型芯和型腔的创建（Parasolid 平台）

图 9-17 是从 IMOLD-Works 的工作屏幕上截取下来的，图中显示了用于模具设计过程的基本的 GUI，所提供的功能都显示在视窗系统图标中。能应用标准视窗的功能，使设计任务对用户非常友好。如果设计者希望具有先进的模式化特征，更可获得 SolidWorks 功能。它也允许 IMOLD-Works 作为真正的综合模块嵌

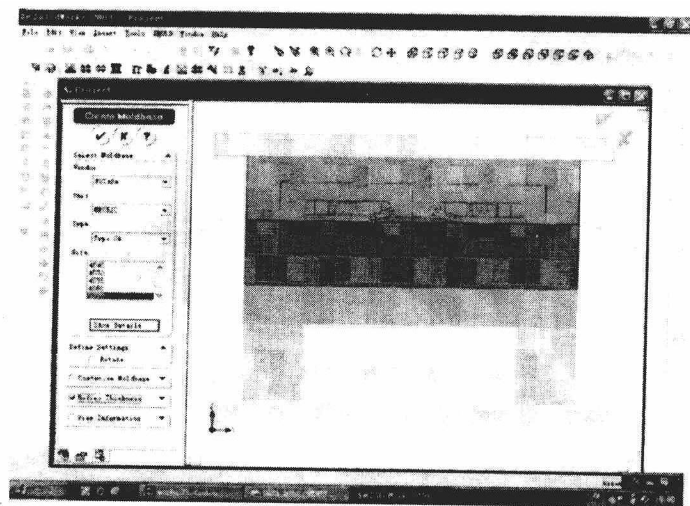


图 9-17　IMOLD-Works 用户界面的示例

入 SolidWorks 内。在图 9-18 和图 9-19 中所示的分别是布局设计和型芯/型腔的创建模块。在 IMOLD-Works 中完成的模具设计和装配体如图 9-20 所示。该实例表明这个系统设计复杂工业模具的功能是实用的。

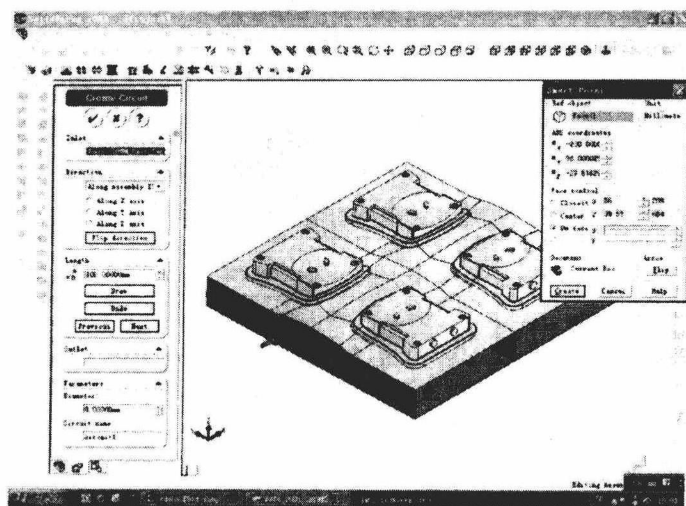


图 9-18　布局设计模块（IMOLD-Works 许可）

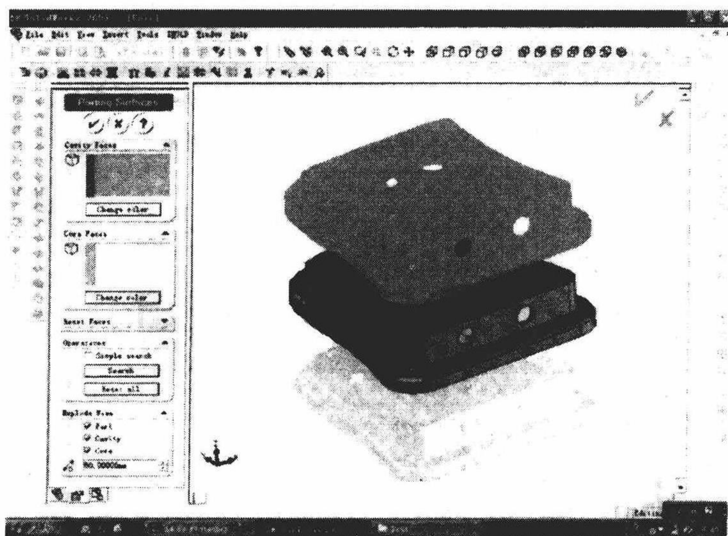


图 9-19　型芯和型腔的创建（IMOLD-Works 许可）

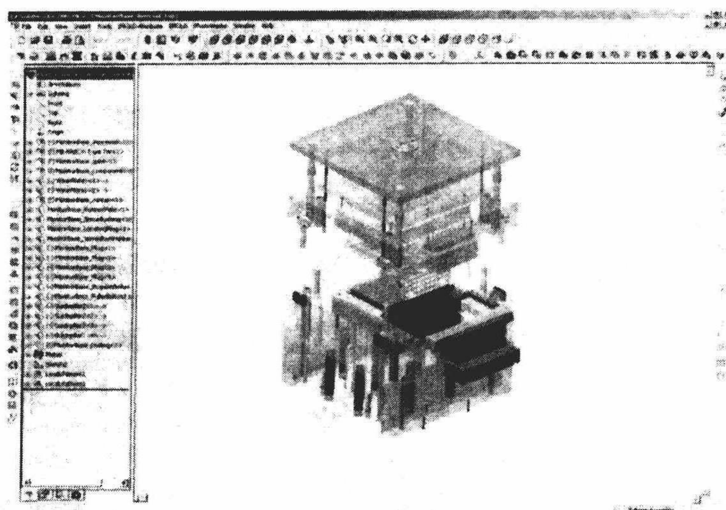


图 9-20 IMOLD-Works，Windows 视窗为基础的模具设计系统
（新加坡 Manusoft Technology 私人有限公司许可）

9.2.4 压铸模的视窗设计系统

Windows 塑料注射模设计方法也能用于类似的压铸模设计。压铸模设计的一般过程包括了布局设计、浇注系统、压铸模模架、分型、顶出系统、冷却设计和型芯移动机构等。除了浇注系统外，大部分设计进程都与塑料注射模类似。一个典型的压铸模模架，也称为压铸装置，由超过 50 个零部件装配组成。如果将一个个零件造型，那将会是十分沉闷和费时的，所以需要开发能自动生成压铸模的设计系统。

为了促使压铸模标准模架装配体的自动生成，各种零部件和模架装配体都应被参量模式化，它们的尺寸按照模架的种类和参数而变化。由数据库支持的目录单上所需的参数，可自动生成压铸模的模架。这得益于标准压铸模模架的商业化，使得建立这些模架的装配体变得十分方便。为选择所需压铸模模架的类型和参数，必须要有用户界面。用户只需要在界面上点击系统就会自动输出所需的模架。以 Windows 视窗为基础的压铸模设计模式，连接如 SolidWorks 等三维 CAD 软件，使用添加的动态连接库 DLL（Dynamic Linked Library）文件。这些文件的框图如图 9-21 所示。

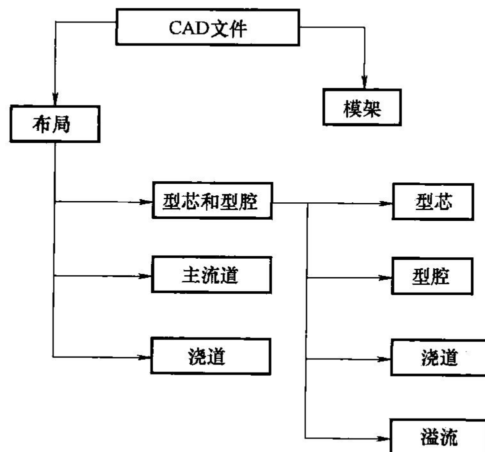


图 9-21 压铸模设计文件

为了满足浇口的设计，需建立浇注特性库。它定义和存储了以往浇注系统设计中先进和适用的特征。在设计进程中，浇注系统各组成的几何体可自动生成。从数据库得到浇注的特征，用几何参数建立相应的几何体。半自动化压铸模设计的处理方法，已经在第4章中讨论过了。

9.2.5　示例说明

实质上，建立压铸模系统与塑料注射模系统没有实质上的区别。在任何基于 Windows/NT 的 CAD 系统中，标准的程序应用界面 API 都有提供，塑料注射模模具设计的结构和数据结构，同样能用在压铸模的设计中。因为有许多相似功能，压铸模设计作为可嵌入模具设计软件的子模块。它建立起的所有功能，诸如分型、具有溢流的浇道、浇注系统和模架的创建，都可在这两个注射模块中共享。对于浇道和浇口，充模浇注系统的菜单，溢流、浇道和主流道设计，分别展现在图9-22和图9-23中。

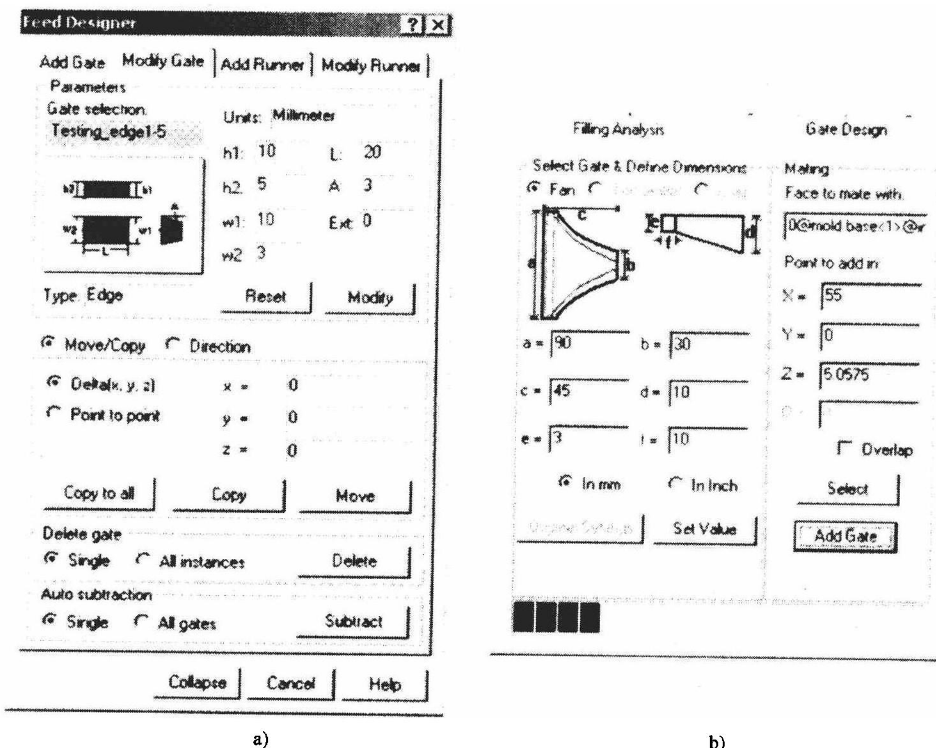


图9-22　浇注系统设计菜单

a）浇注设计　b）浇口设计

各经销商的模架尺寸设置在模架设计模块中。图 9-24 所示的模架设计器，为选择模架、改变模板厚度提供了工具，且定制了模架。在 IMOLD-Works 中，有众多经销商，如 DME、FUTABA、HASCO、HOPPT、LKM 和 STIEHL 等。都在 IMOLD-Works 里建起参量化的模架，使设计更为容易。使用单一界面，模架设计器帮助用户选择和加载标准模架，也可显示如何修改和添加额外的模板并增添到模架中。模架设计器也有定制模板数量和厚度的功能。在模架设计器中，用户将看到 DME 模架命名的 Type-B、N-size 等，使模架的选择的更加便利。

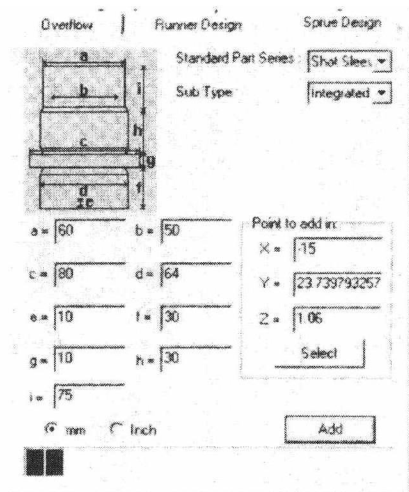


图 9-23 溢流、浇道和主流道设计菜单

首先添加侧向滑块机构/内滑杆机构。使用参量化的选定表，对侧滑块/内滑杆机构的位置进行参数化定义。图 9-25 上所示的零部件组件通道 Components Gallery，允许在设计中添加标准组件。用户以标准尺寸或调整成客户需要的制造尺寸，来修改组件。图 9-26 上所示的滑块/滑杆机构设计模块，使得滑杆体可得到简易的创建开发。用户首先从数据库中选择滑杆机构的类型和参数，选定后添加

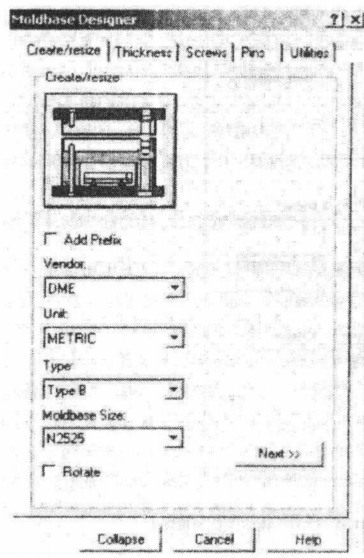


图 9-24 模架设计器菜单

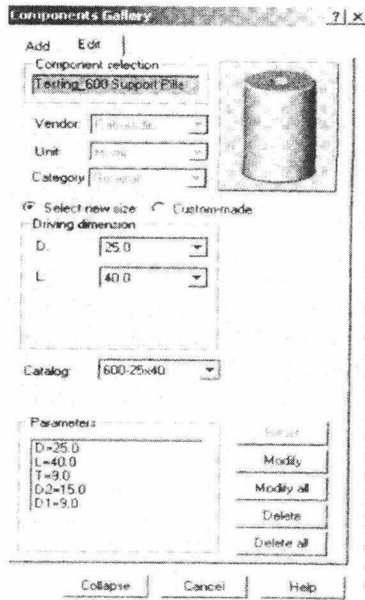


图 9-25 组件库的创建器

到设计中的位置。接着，用户可以用编辑功能修改滑杆体完成模具设计。为了说明工业模具设计时 IMOLD-Works 的应用，我们将复杂顶出系统设计展现在图 9-27中，将计算机调控的模具设计显示在图 9-28 中。

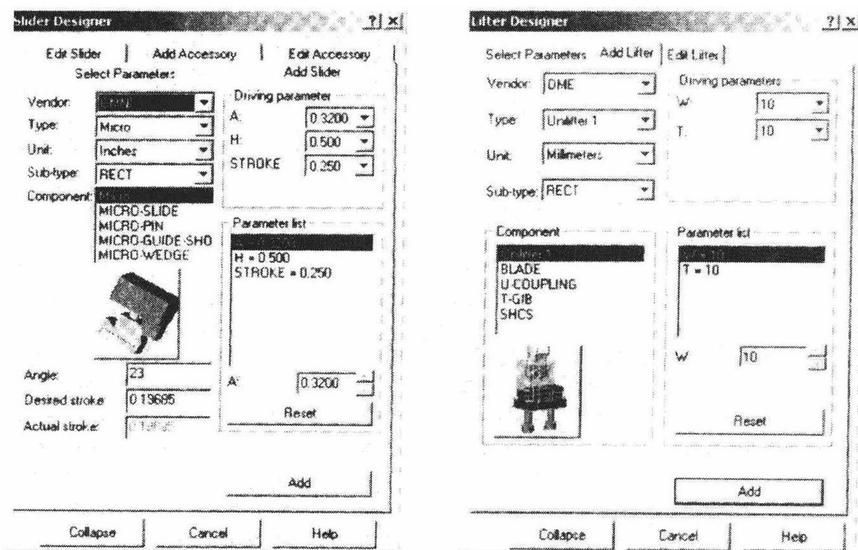


图 9-26　侧滑块和内滑杆机构设计模块

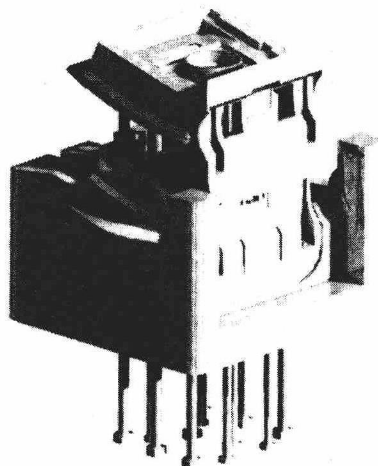


图 9-27　例 1——顶出系统设计

（新加坡 Manusoft Technology 私人有限公司许可）

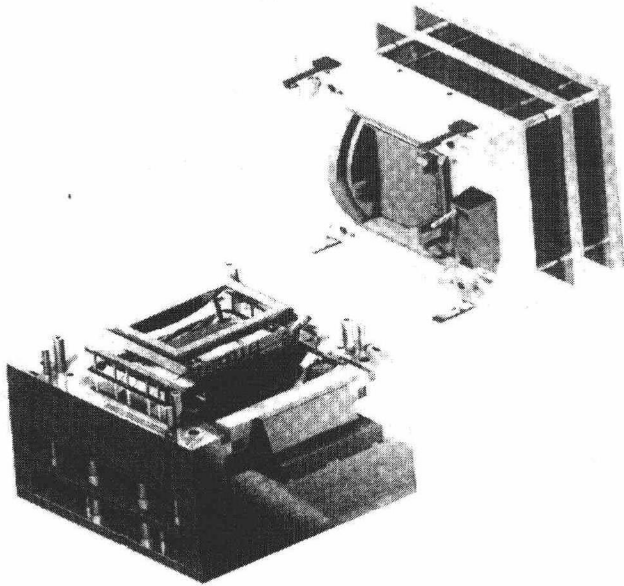


图 9-28 例 2——IMOLD-Works 中的计算机调控的模具设计
（新加坡 Manusoft Technology 私人有限公司许可）

9.3 综述

本章介绍了计算机辅助注射模具设计的一些模式和系统研究的方法。详细介绍了具体的设计方法及其应用。早期模具设计是项非常依赖经验的任务，目前已发展到可通过智能的 Pro/Mold、IMOLD®和 UG Moldwizard 等这些工业应用系统来完成设计了。使用这些系统，可使模具设计者比用传统的设计方法能节省多于70%的时间。虽然智能化 KBE 系统能接受设计规则，且容易嵌入到系统中，但是它受到模式化能力上的限制，不能提供充分的功能来创建复杂模具。随着台式计算机计算能力的增强，基于 Windows 的设计系统已经很好地用于目前的工业领域。开发这些软件只附加了相当低的成本，并在图形界面上设置了所需的图标和菜单。标准的视窗 Windows/NT 环境，比传统的 UNIX 为基础的系统给设计者更多的好处。期待模具 CAD 系统能在未来 10 年里在 CAD/CAM 市场占主导地位。综合、实用且便于解决模具设计问题，又在 Windows 环境下的模具设计系统，如 IMOLD-Works 必将成为标准的模具设计软件。虽然目前用户界面还不够丰富，但此 Parasolid 系统的实体核心平台，解决了简易、经济地开发第三方应用设计的问题。有了它，人们可不必再使用要求强大的程序应用界面 API 来迎合模具设计需求的任何商业化 CAD 系统了。

参考文献

[1] R.A. Gammon, ESKIMO: "An Expert System for Kodak Injection Mold Operation" Artificial Intelligence in Engineering Design. Vol 3, pp 81-104, 1991.

[2] S.D. Pratt and M. Sivakumar, "A Knowledge-based Engineering system for the Design of Injection Molded Plastic Parts," Advance in Design Automation, ASME, Vol 1,1993, pp 65-71.

[3] T. Sakai, E. Usuki and Y. Murakami, "Intelligent CAD system for railway bogie truck design", Proc of INCON'91, IEEE, 1991, pp42-47.

[4] D. Cinquegranna, "Intelligent CAD automated plastic injection mold design", Mechanical Engineering, July 1990 issue.

[5] K.S. Lee, J.Y.H. Fuh, Y.F. Zhang, Z. Li and A.Y.C. Nee, "IMOLD: An intelligent plastic injection mold design and assembly system", Institute of Engineers Singapore (IES) Journal, 36, no. 4:7-12, 1996.

[6] ICAD, User Manuals Vol. 1 to 12, Version 5.0, Concentra Inc., Cambridge, Massachusetts, 1995.

[7] UG-II, User Manual Version 10.5, Unigraphics, Electronic Data System, Cypress, CA, 1995.

[8] IMOLD® was a registered trademark of the National University of Singapore (NUS) and licensed to Manusoft Technology Pte. Ltd., Singapore, a spin-off company from NUS.

[9] K.S. Lee, Z. Li, J.Y.H Fuh, Y.F. Zhang, and A.Y.C. Nee, "Knowledge-based injection mold design system", In Proc of the Int'l Conf and Exhibition on Design and Production of Dies and Molds, Istanbul, Turkey, 1997, pp. 45-50.

[10] IMOLD home page, http://www.eng.nus.edu.sg/imold, 1998.

[11] Y. F. Zhang, J.Y.H. Fuh, K.S. Lee and A.Y.C. Nee, "IMOLD: An Intelligent Mold Design and Assembly System", In Computer Applications in Near Net-Shape Operations, edited by A Y C Nee, S K Ong and Y G Wang, Springer-Verlag, 1999, pp.265-284.

[12] IMOLD v4.1 User Manual, Manusoft Plastic Pte. Ltd., Singapore, 1999.

[13] UG/open API reference, Vol. 1 to Vol. 4, Unigraphics Solution Co., Maryland Heights, MO, 1997.

[14] Unigraphics Essentials User Manuals, Vol. 1, Unigraphics Solution Co., Maryland Heights, MO, 1997.

[15] Parasolid On-Line Documentation Web, Parasolid V10.1.123, Unigraphics Solutions Co., Maryland, 1997.

[16] 'SolidWorks 2001', SolidWorks Corporation, MA, 2001.

[17] SolidWorks 99 API documentation, SolidWorks Corporation, MA, 1999.

[18] IMOLDWorks, Manusoft Technology Pte Ltd, Singapore, http://www.imold.com, 2003.

[19] IMOLDWorks User's Manual, Manusoft Technology Pte. Ltd., Singapore, 2003.

[20] L. Kong, J.Y.H. Fuh, K.S. Lee, Y.F. Zhang and A.Y.C. Nee, X.L. Liu, L.S. Lin, "A Windows-native 3D plastic injection mold design system", J of Materials Processing Technology, 2003, in press.

[21] L. Kong, "Development of a Windows-based computer-aided plastic injection mold design system, MEng thesis, National University of Singapore, 2000.

模具的专用术语

垫板 Backing plate：模具中型腔镶块的支撑板。

压铸 Casting：熔融金属在模具中凝固成制件的过程。

型腔 Cavity：模具中熔融金属成型为一定形状的凹腔部分。

型腔（镶块）Cavity（block insert）：嵌入到模板的零件，模塑成型外部特征，也相当于型腔嵌件。

冷却管道/水管 Cooling channel/line：为了冷却压铸模或注塑模，通入水流的管道，也称水管。

型芯（凸模/嵌件）**Core**（block/insert）：成形制件内部特征的模具零件，通常安装在动模上。

流道凝料脱模 Degating：分离流道和浇注系统的模塑凝料的过程。

模具 Die：给与制件形状的工具。它通常由成对的两金属块构成型腔，来成型熔融金属。

压铸模塑 Die casting：将非铁金属，如铝、镁、锌和铜等，成型有精确参数铸件的加工工艺。

压铸件 Die-casting：压铸模塑加工制造的铸件。

压铸模具 Die casting die：金属注射的压铸工具。

压铸模架 Die base/set：压铸模的零部件组成的装配体。

脱模斜度 Draft angle：给予成型零件表面以微小角度或斜度，便于从模具上脱出模塑制件。

顶出装置（推杆）**Ejector**（pin）：常用有推杆的脱模机构，将固化的模塑制件顶出模具。

推板 Ejector plate：安装推杆的模板。

电极 Electrode：利用放电能量电蚀材料，成型零件几何形状的工具。它包括电极工具和电极夹持部两部分。

溢边 Flash：在模塑过程中在制件表面上生成的薄翅条。由于模具中的加工间隙和过量注射，常出现在动模型芯分型面的周边上。

浇口/浇注 Gate/gating：将熔融材料从流道联通到模具型腔的限制性小通道。

热流道/流道板 Hot runner/manifold：对照常规冷流道的一种流道类型。流道中材料在加工成型中保持熔融状态，不随模塑件脱模。

凹模型腔 Impression：模具的型腔数目可以设计成单型腔或 2、4、16、64 等多型腔。

注射（**模塑**）**Injection**（molding）：施压力于流动态的塑料、金属或陶瓷材料，注入到注塑模或压铸模中。

嵌件 Insert：通常将金属制件放置在模具中，在塑料包裹下模塑成整体的制品。

内滑杆机构 Lifter：该机械组件用来成型内部的，难以成型的加工特征。

滑杆头部 Lifer head：滑杆机构中用来成型的主要零件，获得模塑件内表面的形状。

注射模具 Mold：该机械工具将熔融态的塑料由注射模塑工艺加工成所需形体。

模架 Mold base：由模具商业市场按用户需要，快速提供大多数标准件的组装模具。

模塑制件 Molding：注射模塑加工制成的模塑件。

溢流槽 Overflow：小型存储器附设在分型面上。在型腔充填期间，吸纳不需要的非金属杂质或杂物。

分型 Parting：在模具设计过程中，通过分开两半模，创建型芯和型腔凹模零件。

分型线 Parting line：模具两半模闭模时，型芯和型腔与模塑件表面的相交边界。

分型表面 Parting surface：模具里型芯和型腔的配对表面。

压板 Platen：与成型机械构成框架的较大扁厚钢板。

柱塞 Plunger：与圆筒间隙装配的钢柱体，在注射生产时往复运动。

流道 Runner：让熔融材料从主流道流入型腔，是在模具分型面上的连接通道。

注射或脱模 Shot：将熔融的材料注入注塑模，或从压铸模中脱出固化金属。

侧滑块机构 Slider：用来模塑成型外部特征的机械组装件。

主流道 Sprue：注塑模或压铸模上，将熔融材料首先注入的通孔。

脱模板 Stripper plate：在注塑模的凸模位置上可移动钢板，它向前滑动将注塑件从型芯上推出。

导柱 Tie bar：在压铸机/注塑机上，连接定模板和动模板的柱体。

干涉 Undercut：限制或禁止模塑件从模具上脱出，为模塑成型的特征。

排气槽 Vent/venting：在模具的分型表面上切挖的小槽，引导排除模具中气体。

熔合缝 Wend line：分离的熔融料流汇合后在表面形成的接缝痕。

国际视野　科技前沿

本书介绍了塑料注射模和金属压铸模计算机辅助设计和制造的最新研究成果，并结合许多工业实例，着重介绍了自动或半自动的计算机辅助注射模设计系统——CADIMDS，不仅阐述了该系统的整套方法，而且介绍了其算法、执行程序和系统结构。书中还深入分析了模具智能化设计和装配，介绍了IMOLD 的主要功能和商业化情况，以及以UNIX®和Windows®两者为基础的模具智能化设计系统的研究状况；探索了各种系统的结构和技术，分析了确定影响和强化CADIMDS系统软件的因素；介绍了测算有效成本的各种策略，阐述了在计算机辅助工艺规程(CAPP)中，对模具零部件制造工艺的专门处理要素。

本书是作者们经过多年的研究，对模具智能化设计关键技术方面的发展与创新的总结。对从事精密机械工程的开拓者和设计师们来说，本书是一本具有很高参考价值的参考资料。



CRC Press
Taylor & Francis Group

上架指导：工业技术／机械工程／模具

地址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服务中心：(010)88361066
销 售 一 部：(010)68326294
销 售 二 部：(010)88379649
读者服务部：(010)68993821

邮政编码：100037
网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com

ISBN 978-7-111-29058-2
封面设计：鞠杨
定价：52.00元

